

YATSEN JEP THE MALDONADO SOTO

**A MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO APOIO A TOMADA DE
DECISÃO EM CASO DE DERRAME DE ÓLEO NA PARTE INTERNA
DO COMPLEXO ESTUARINO ANTONINA-PARANAGUÁ-PR**

**Dissertação apresentada ao Curso de
Engenharia de Recursos Hídricos e
Ambiental, do Setor de Tecnologia da
Universidade Federal do Paraná como
requisito parcial à obtenção do grau de
Mestre.**

Orientador: Prof.º Eduardo Felga Gobbi

**Co-orientador: Prof.º José Eduardo
Gonçalves**

CURITIBA

2004

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

A meu orientador Eduardo Felga Gobbi pela sua disposição no desenvolvimento deste trabalho até sua conclusão, suas dicas sobre o sistema e principalmente sua grande personalidade amigável.

A José Eduardo Gonçalves pelas muitas noites dedicadas para cada parte deste trabalho como co-orientador.

Ao professor Heinz Dieter Oskar August Fill pelo suporte sobre as dúvidas sobre as equações da hidrodinâmica e as suas sugestões.

Ao professor Eloy Caviski pelo suporte nas equações de transporte, esclarecimentos e sugestões.

A professora Regina Tiemi Kishi pela sugestão do tema dentro de suas aulas de modelagem hidrodinâmica.

A professora Maria Cristina Braga e Sergio pelas sugestões feitas as quais foram consideradas no trabalho

A Fernanda Helena Ferreira Leite assessora técnica do Ministério de Meio Ambiente, pelas informações fornecidas sobre os Planos de contingência.

A Rodrigo Reksidler por ter participado como principal apoio nas funcionalidades e na parte operacional do programa SisBAHIA.

A Lidio Odreski por facilitar os dados de seus estudos da região e sua disposição a colaborar.

A professora Miriam Moro Mine pela determinação e objetividade com que coordenou o mestrado durante a sua gestão o qual foi muito positivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Cristóvão Scapulatempo Fernandes pelos trabalhos de coordenação e os diálogos abrangentes no âmbito de desenvolvimento de dissertação e propósitos do curso.

Ao SIMEPAR por facilitar a disponibilidade do seu estabelecimento para desenvolvimento deste trabalho.

Ao CEM e a APPA por disponibilizar os dados da região.

A Marcio Froelich Friedrich pelas amplias troca de idéias e informação na área de modelagem hidrodinâmica.

A César Jhojy Yoshizawa pelo auxilio na resolução dos problemas de informática.

A minha namorada Patricia Bastos Kammradt pela revisão ortográfica da primeira parte do trabalho e sugestões.

A Reverton Neundeorf pela revisão ortográfica da Segunda parte do trabalho.

A Gerald Herrling por disponibilizar os dados de seus estudos da região e sua disposição a colaborar.

A Nicolas Lopardo pelos livros sugeridos e emprestados assim como também pelas sugestões.

A Giancarlo Castanharo pelas observações feitas tomando como embasamento a sua experiência em modelagem.

A Rafael de Souza Favoreto por disponibilizar fotos aéreas da região.

A Paulo César Colonna Rosman pela revisão do modelo e a sugestões feitas.

A meu pai “el ingeniero” Martin Jephthe Maldonado Perez e minha família pelo apoio financeiro prestado para o desenvolvimento do trabalho.

E a todos os colegas, amigos, professores e Instituições que de uma forma u outra colaboraram no inicio, desenvolvimento e finalização do presente trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE GRÁFICOS.....	XI
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
SIMBOLOGIA.....	XV
RESUMO.....	XX
RESUMEN.....	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	6
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRODINÂMICA	10
2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSPORTE	29
2.3 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS MATEMÁTICOS	34
2.3.1 Método das Diferenças Finitas.....	35
2.3.2 Método dos Volumes Finitos	35
2.3.3 Método dos Elementos Finitos.....	36
2.4 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO	37
2.4.1 Composição Química	37
2.4.2 Propriedades Físico-Químicas do Petróleo.....	39
2.4.2.1 Densidade.....	39
2.4.2.2 Viscosidade	42
2.4.2.3 Distribuição dos pontos de ebulição.....	42
2.4.2.4 Ponto de inflamação	43
2.4.2.5 Ponto de fluidez ou corrimento	43
2.4.2.6 Solubilidade.....	44
2.4.2.7 Formação de emulsões.....	44

2.5	ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES E PROCESSOS DE ENVELHECIMENTO DO PETRÓLEO.....	44
2.5.1	Viscosidade	45
2.5.2	Densidade.....	47
2.5.3	Espalhamento	48
2.5.4	Evaporação.....	52
2.5.5	Dispersão.....	56
2.5.6	Sedimentação	58
2.4.7	Emulsificação	60
2.5.8	Dissolução.....	63
2.5.9	Degradação.....	64
2.5.9.1	Oxidação fotoquímica.....	64
2.5.9.2	Biodegradação	65
2.6	LEGISLAÇÃO.....	66
2.6.1	Legislação Internacional.....	66
2.6.2	Legislação Nacional	69
3	SISTEMA BASE DE MODELOS A SER APLICADO.....	75
3.1	MODELO MATEMÁTICO DA HIDRODINÂMICA.....	76
3.1.1	Principais Aproximações	76
3.1.1.1	Mudança para um referencial solidário com a terra.....	76
3.1.1.2	Incompressibilidade.....	79
3.1.1.3	Fluido Newtoniano	79
3.1.1.4	Aproximação hidrostática	80
3.1.1.5	Aproximação de Boussinesq.....	80
3.1.1.6	Promediação das tenções turbulenta.....	81
3.1.1.7	Elevação da superfície livre	83
3.1.1.8	Velocidade vertical	84
3.1.2	Sistema de Equações para Águas Rasas.....	84
3.1.3	Imposições das Condições Iniciais e de Contorno.....	88
3.1.3.1	Condições iniciais.....	88
3.1.3.2	Condições de contorno	89

3.2	MODELO MATEMÁTICO DO TRANSPORTE.....	89
3.3	MODELO DE DECAIMENTO DO ÓLEO.....	90
4	CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DE ESTUDO	91
4.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	91
4.2	CLIMA	92
4.3	DINÂMICA HÍDRICA	93
4.4	SEDIMENTO DE FUNDO	94
4.5	PRINCIPAIS RIOS	97
5	DADOS DO COMPLEXO ESTUARINO ANTONINA PARANAGUÁ	102
5.1	BATIMETRIA	102
5.2	NÍVEIS DE ÁGUA.....	103
5.3	VENTO.....	104
5.4	VELOCIDADES DE CORRENTE	105
5.5	DESCARGA DE RIO	106
5.6	CONSTITUINTES ASTRONÔMICAS	107
6	IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS	108
6.1	METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO.....	108
6.1.1	Geração da Malha Numérica	109
6.1.2	Interpolação da Batimetria.....	111
6.1.3	Dados Utilizados no Modelo	111
6.1.4	Condições Iniciais e de Contorno	111
6.1.4.1	Condições iniciais.....	112
6.1.4.2	Condições de contornos abertos.....	113
6.1.4.3	Condições de contornos de terra	113
6.1.5	Testes de Sensibilidade do Modelo.....	113
6.1.5.1	Verificação global do modelo	114
6.1.5.2	Sensibilidade do modelo a mudanças nos parâmetros numéricos	114
6.1.5.2.1	Efeito do intervalo de tempo	115
6.1.5.3	Sensibilidade do modelo a mudanças nos parâmetros físicos.	117
6.1.5.3.1	Efeito da rugosidade do fundo	117
6.1.5.3.2	Efeito da viscosidade turbulenta	118

6.1.5.3.3 Efeito Do Vento Local	119
6.1.5.4 Conclusão.....	119
6.2 CALIBRAÇÃO.....	120
7 SIMULAÇÕES DE HIDRODINÂMICA E DERRAME DE PETRÓLEO ..	123
7.1 CENÁRIO 1	124
7.1.1 Balanço de Massa do Hidrocarboneto	124
7.1.2 Transporte Lagrangeano Advectivo Difusivo	125
7.2 CENÁRIO 2.....	131
7.2.1 Transporte Lagrangeano Advectivo Difusivo	131
7.3 CENÁRIO 3.....	136
7.3.1 Balanço de Massa do Hidrocarboneto	136
7.3.2 Transporte lagrangeano advectivo difusivo.....	137
7.4 CONCLUSÕES.....	142
8 CONCLUSÕES	144
REFERÊNCIAS	147
APÊNDICE I	154
APÊNDICE II.....	158
APÊNDICE III	160

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - ELEMENTO DIFERENCIAL INFINITESIMAL FIXADO NO ESPAÇO COM DIAGRAMA DE FLUXO DE MASSA ATRAVÉS DAS VÁRIAS FACES DO ELEMENTO.....	11
FIGURA 2.2 - ELEMENTO DIFERENCIAL COM DISCRETIZAÇÃO DAS FORÇAS NA DIREÇÃO X	14
FIGURA 2.3 - FLUXO DE ENERGIA ASSOCIADO A UM ELEMENTO INFINITESIMAL	21
FIGURA 2.4 - COMPORTAMENTO DO ÓLEO DERRAMADO EM UM CORPO DE ÁGUA	45
FIGURA 3.1 - REFERENCIAIS UTILIZADOS.....	77
FIGURA 3.2 - SISTEMA DE COORDENADAS DO SISTEMA DE MODELAGEM (3D & 2DH).....	85
FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO.....	91
FIGURA 4.2 - PONTOS AMOSTRADOS NA BAÍA DE ANTONINA, PORÇÃO OCIDENTAL DA BAÍA DE PARANAGUÁ E NA ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE AS DUAS BAÍAS EM 1966 (A) (BIGARELLA, 1978) E 1995 (B).(PETROBRAS, 1997).....	95
FIGURA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA BAÍA DE ANTONINA E SETOR OCIDENTAL DA BAÍA DE PARANAGUÁ EM 1966 (A) E 1995 (B)	96
FIGURA 4.4 - AREA DE DRENAGEM. OS PONTOS NO INTERIOR DAS SUB- BACIAS REPRESENTAM O LOCAL DE MEDIÇÃO E A REGIÃO PONTILHADA À ÁREA ONDE O APORTE NÃO FOI DIRETAMENTE QUANTIFICADO	99
FIGURA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DOS DADOS BATIMÉTRICOS	103
FIGURA 5.2 - LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÕES	104
FIGURA 5.3 - REGIÃO DE COLETA DE VELOCIDADES DE CORRENTE	106
FIGURA 6.1 - CONTORNO DA REGIÃO A SER MODELADA	110

FIGURA 6.2 - CONTORNOS DE TERRA E ABERTO.....	112
FIGURA 6.3 - MALHA COM 366 ELEMENTOS	115
FIGURA 6.4 - CAMPO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA SUPERFÍCIE OBTIDA COM BASE NO COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES PARA UM PERÍODO DE 30 DIAS EM INTERVALOS DE 0,5 HORAS.....	127
FIGURA 6.5 - 10 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	127
FIGURA 6.6 - 20 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	128
FIGURA 6.7 - 30 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	129
FIGURA 6.8 - 40 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	129
FIGURA 6.9 - 50 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	130
FIGURA 6.10 - CAMPO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA SUPERFÍCIE OBTIDA COM BASE NO COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES PARA UM PERÍODO DE 30 DIAS EM INTERVALOS DE 0,5 HORAS.....	132
FIGURA 6.11 - 10 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	133
FIGURA 6.12 - 20 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	134
FIGURA 6.13 - 30 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	134
FIGURA 6.14 - 40 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	135
FIGURA 6.15 - 50 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	135
FIGURA 6.16 - CAMPO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA SUPERFÍCIE OBTIDA COM BASE NO COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES PARA UM PERÍODO DE 30 DIAS EM INTERVALOS DE 0,5 HORAS.....	138
FIGURA 6.17 - 10 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	139
FIGURA 6.18 - 20 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	140
FIGURA 6.19 - 30 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	140
FIGURA 6.20 - 40 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	141
FIGURA 6.21 - 50 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO	142
FIGURA A1 - VENTO NA ESTAÇÃO DE PONTAL DO SUL, PARA O PERÍODO DE AGOSTO/1982 A DEZEMBRO/1986 INPH (1988).....	155
FIGURA A2 - VELOCIDADES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EM MARÉ ENCHENTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM	156

FIGURA A3 - DIREÇÕES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EN MARÉ ENCHENTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM.....	156
FIGURA A4 - VELOCIDADES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EM MARÉ VAZANTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM.....	157
FIGURA A5 - DIREÇÕES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EN MARÉ ENCHENTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM.....	157
FIGURA A6 – COMPARAÇÃO DE ELEVAÇÃO DAS MALHAS DE RESOLUÇÃO DE 366, 531 E 783 ELEMENTOS.....	159
CARACTERISTICAS DO DECAIMENTO DO ÓLEO SEGUNDO ADIOS2.....	160
FIGURA A7 – ÓLEO REMANESCENTE	161
FIGURA A8 – DENSIDADE DO ÓLEO	161
FIGURA A9 – VISCOSIDADE DO ÓLEO.....	162
FIGURA A10 – PERCENTAGEM DE AGUA CONTIDO NO ÓLEO	162
FIGURA A11 – PERCENTAGEM DE ÓLEO EVAPORADO.....	163
FIGURA A12 – CONCENTRAÇÃO DE BENZENO NO AR.....	163
FIGURA A13 – ÓLEO REMANESCENTE	164
FIGURA A14 – DENSIDADE DO ÓLEO	164
FIGURA A15 – VISCOSIDADE DO ÓLEO.....	165
FIGURA A16 – PERCENTAGEM DE AGUA CONTIDO NO ÓLEO	165
FIGURA A17 – PERCENTAGEM DE ÓLEO EVAPORADO.....	166
FIGURA A18 – CONCENTRAÇÃO DE BENZENO NO AR.....	166

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 - VOLUME DO ÓLEO E ÁGUA EM EMULSÃO DE ÓLEO, REMANECENTE NA SUPERFÍCIE DO MAR PARA OS QUATRO GRUPOS.	41
GRÁFICO 2.2 - (A) VARIAÇÃO DA DENSIDADE COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO (B) VARIAÇÃO DA VISCOCIDADE COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO.....	48
GRÁFICO 2.3 - AS TRÊS FASES DE ESPALHAMENTO DE UMA MANCHA DE PETRÓLEO EM AGUAS CALMAS.....	49
GRÁFICO 6.1 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO.....	116
GRÁFICO 6.2 - DETALLE DA SERIE TEMPORAL DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO	116
GRÁFICO 6.3 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES RUGOSIDADES.....	117
GRÁFICO 6.4 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES VISCOSIDADES	118
GRÁFICO 6.5 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE VENTO.....	119
GRÁFICO 6.6 - SERIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFICIE DO MAR MEDIDO E MODELADO PARA A ESTAÇÃO DE ANTONINA.	122
GRÁFICO 6.7 - CURVA DE DECAIMENTO DO PETRÓLEO BACHAQUERO 17 PARA 5 DIAS	125
GRÁFICO 6.8 - ELEVAÇÕES DA SUPERFÍCIE NO NÓ 625.....	126
GRÁFICO 6.9 - ELEVAÇÕES DA SUPERFÍCIE NO NÓ 625.....	132
GRÁFICO 6.10 - CURVA DE DECAIMENTO DO PETRÓLEO BACHAQUERO 17 PARA 5 DIAS	137
GRÁFICO 6.11 - ELEVAÇÃO DA SUPERFICIE NO NÓ 625	138

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS ÓLEOS COM BASE NA GRAVIDADE	
API	40
TABELA 2.2 - APARÊNCIA DO ÓLEO NO MAR.....	42
TABELA 2.3 - FÓRMULAS E COEFICIENTES DE FAY PARA OS DIFERENTES	
REGIMES DE ESPALHAMENTO	50
TABELA 4.1 - DADOS DE VAZÃO E ÁREA TOTAL DAS BACIAS DE	
DRENAGEM DOS PRINCIPAIS RIOS QUE DESEMBOLCAM NAS BAÍAS DE	
ANTONINA E PARANAGUÁ (ATÉ A PROXIMIDADE DA CIDADE DE	
PARANAGUÁ), NA CAMPANHA DE INVERNO DE 1997 (DIAS 13, 15 E	
16/08/97).....	100
TABELA 4.2 - DADOS DE VAZÃO E ÁREA TOTAL DAS BACIAS DE	
DRENAGEM DOS PRINCIPAIS RIOSQUE DESEMBOLCAM NAS BAÍAS DE	
ANTONINA E PARANAGUÁ (ATÉ A PROXIMIDADE DA CIDADE DE	
PARANAGUÁ), NA CAMPANHA DE VERÃO DE 1998 (DIAS 12, E	
16/08/97).....	101
TABELA 5.1 – RIOS A SER UTILIZADOS NA MODELAGEM	106
TABELA 5.2 - CONSTANTES HARMÔNICAS DE ELEVAÇÃO DE MARÉ:	
AMPLITUDES (EM CM) E FASES EM RELAÇÃO A GREENWICH (EM	
GRAUS) PARA OS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA	107
TABELA 6.1 - CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS ANALIZADAS.....	110

LISTA DE SIGLAS

REPAR	– Refinaria Presidente Getulio Vargas
REDUC	– Refinaria Duque de Caxias
UV	– Ultra Violeta
PAH	– Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
ITOPF	– International Tanker Owners Pollution Federation
S	– Enxofre
N	– Nitrogênio
C	– Carbono
H	– Hidrogênio
O	– Oxigênio
BTEX	– Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, xilenos.
API	– American Petroleum Institute
NOAA	– National Oceanic and Atmospheric Administration
ADIOS2	– Automated Data Inquiry for Oil Spills
OILPOL	– International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil
IMCO	– Intergovernmental Maritime Consultative Organization
SOLAS	– Surface Ocean - Lower Atmosphere Study
OMI	– International Maritime Organization
CLC	– Civil Liability Convention
MARPOL	– International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
OPRC	– Oil Pollution Preparedness, Response and Co-Operation
CONAMA	– Conselho Nacional de Meio Ambiente
IBAMA	– Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
DPC	– Diretoria de Portos e Costas
ISM	– International Safety maritime
ANP	– Agencia Nacional de Petróleo
LESTA	– Lei de segurança do Trafego Aquaviário

SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente
PEI – Plano emergencial individual
PA – Planos de Área
SisBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
LES – Large Eddy Simulation
IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná
INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Aeroespacial
DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação
CEM – Centro de Estudos do Mar
SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná
INPH – Instituto de Pesquisas Hidroviárias
ADCP – Acousting Doppler Current Profiler
UTM – Universal Transverse Mercator
APPA – Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina
MMA – Ministério de Meio Ambiente

SIMBOLOGIA

x,y,z	- Sistema de coordenadas cartesianas
u	- Velocidade na direção de x
v	- Velocidade na direção de y
w	- Velocidade na direção de w
ρ	- Densidade
t	- Tempo
dy	- Diferencial de y
dx	- Diferencial de x
dz	- Diferencial de z
∇	- Del
F_x	- Força na direção x
M	- Massa
f_x	- Força de corpo na direção x
f_y	- Força de corpo na direção y
f_z	- Força de corpo na direção z
$\frac{D}{Dt}$	- Derivada material, total, substantiva
μ	- Coeficiente de viscosidade molecular
λ	- Segundo coeficiente de viscosidade
p	- Pressão
V	- Volume
ϕ_x	- Fluxo de calor na direção de x
ϕ_y	- Fluxo de calor na direção de y
ϕ_z	- Fluxo de calor na direção de z
\mathfrak{K}	- Condutividade térmica
e	- Energia interna devido ao movimento molecular aleatório
ν	- Viscosidade
q	- Fluxo de massa

q_x	- Fluxo de massa na direção x
q_y	- Fluxo de massa na direção y
q_z	- Fluxo de massa na direção z
D	- Coeficiente de difusão
C	- Concentração
F	- Fonte
P	- Sumidouro
ϕ	- Escalar
U	- Velocidade media na direção x
V	- Velocidade media na direção y
W	- Velocidade media na direção w
$\bar{\phi}$	- Concentração media do escalar
u'	- Termo aleatório na direção x
v'	- Termo aleatório na direção y
w'	- Termo aleatório na direção z
T	- Temperatura
T_0	- Temperatura de referencia 0
μ_0	- Viscosidade inicial
C_T	- Constante empírica
F_{wv}	- Fração volumétrica de água na emulsão
C_M	- Constante empírica adimensional
C_V	- Constante Adimensional de Mooney
F_{em}	- Fração em massa de óleo evaporado
C_E	- Constante empírica
ρ_0	- Densidade de óleo fresco
ρ_e	- Densidade da emulsão
ρ_w	- Densidade da água
C_{DE}, C_{DT}	- Constantes empíricas
R	- Raio de mancha de óleo
g	- Aceleração da gravidade

V_w	- Viscosidade cinemática da água
h	- Espessura da mancha
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	- Constantes empíricas adimensionais
L	- Comprimento característico da mancha
D	- Coeficiente de difusão
V	- Volume de óleo derramado
k_1, k_2, k_3	- Constantes empíricas
A_0	- Área final da fase gravitacional inercial
t_0	- Tempo em que a fase gravitacional inercial termina
W	- Velocidade do vento
K_M	- Constante empírica
V_e^i	- Volume de evaporação da fração i
K_e^i	- Coeficiente de transferência de massa
R	- Constante universal dos gases perfeitos
\bar{V}_i	- Volume molar relativo da fração i
η	- Micro-escala espacial de Kolmogorov
τ	- Micro-escala temporal de Kolmogorov
P_0	- Pressão atmosférica
As_i	- Variação na entropia resultante da evaporação da fração i
A_z	- Fator de compressibilidade
BP_i	- Ponto de ebulição do componente i
$C_{2,i}$	- Coeficiente empírico
D_s	- Diâmetro da mancha
Sc_i	- Numero de Schmidt para a fração i
M_i	- Massa molar de cada fração
k_e	- Coeficiente de transferência de massa
F_C	- Fração volumétrica de óleo evaporado
A, B	- Constantes empíricas.
T_0	- Ponto de ebulição inicial
T_G	- Gradiente de curva de destilação

f_s	- Fração de superfície coberta por crus
d_0	- Diâmetro das partículas
Δd	- Intervalo do diâmetro das partículas
c_{oil}	- Parâmetro determinado experimental
D_{ba}	- Energia de dissipação das ondas
H_0	- Altura da onda
F_{wc}	- Fração de superfície de mar atingida pela rebentação das ondas
W_i	- Velocidade do vento para iniciar o rompimento
T_w	- Período de onda
m_{oil}	- Massa de óleo que permanece à superfície
μ	- Viscosidade dinâmica do óleo
h	- Espessura da mancha
m_d	- Massa de óleo dispersa
m_{sed}	- Massa de óleo sedimentado
V_w	- Viscosidade dinâmica da água
K_a	- Parâmetro de adesão
Z_i	- Profundidade de intrusão das partículas
E	- Taxa de energia dissipada da superfície da água
C_{sed}	- Concentração de sedimento na coluna da água
C_{oil}	- Concentração de partículas de óleo na coluna da água
F_{wv}	- Fração volumétrica de água incorporada na emulsão
F_{wv}^{FINAL}	- Fração volumétrica final de água incorporada na emulsão
R_1	- Taxa de entrada de água
R_2	- Taxa de saída de água
Asph	- Conteúdo de asfalto no óleo
Wax	- Conteúdo de parafina
K_1, K_2	- Constantes determinadas experimentalmente por Rassmussen
Diss	- Dissolução
f_s	- Fração de superfície coberta por crus
A_s	- Área da mancha de óleo

S	- Solubilidade do óleo
S_0	- Solubilidade do óleo fresco
α	- Constante de decaimento
k	- Coeficiente de transferência de massa
\vec{x}	- Vetor posição no referencial acelerado
$\vec{\Omega}$	- Velocidade de rotação
\vec{r}	- Vetor origem
\vec{u}^0	- Vetor velocidade do ponto material no referencial de inércia
x_1, x_2, x_3	- Referencial não inercial
x_1, x_2, x_3	- Referencial inercial
ε_{ijk}	- Tensor alternante
ϕ	- Latitude
\vec{e}_1	- Versor na direção 1 ou x
\vec{e}_2	- Versor na direção 2 ou y
\vec{e}_3	- Versor na direção 3 ou z
H	- Profundidade total desde o fundo até a superfície
h	- Profundidade do fundo respeito a um nível fixo de referencia
P	- Pressão
ρ	- Densidade local do fluido
ρ_0	- Densidade constante de referencia
Φ	- Velocidade angular de rotação da terra
θ	- Ângulo de latitude
ζ	- Nível da superfície respeito ao nível de referencia
h	- Nível do fundo respeito ao nível de referencia
U	- Velocidade média na direção x
V	- Velocidade média na direção y
W	- Velocidade média na direção z

RESUMO

Os derrames de óleo têm representado uma ameaça ambiental importante para as regiões costeiras. As equipes de contingências de derrame vêm-se necessitadas de ferramentas de apoio para desempenhar eficaz e eficientemente seus trabalhos. Para este apoio a modelagem hidrodinâmica apresenta-se como uma ferramenta importante tanto de caráter operacional assim como preventivo. Este trabalho implementa o modelo hidrodinâmico SisBAHIA e o modelo de decaimento do óleo ADIOS2 na baía Antonina-Paranaguá para posterior estudo em um derrame hipotético de 200 m³ em três cenários hidrodinâmicos, considerando como forçantes o vento, a maré e vazões dos rios Nhundiaquara e Cachoeira, para a quantificação da dimensão, espessura, tempo e sentido de deslocamento da pluma. Também é apresentado o decaimento da massa de óleo no transcurso de 5 dias considerando e sem considerar a ação do vento. Conclui-se que os modelos são ferramentas poderosas ao auxílio de tomada de decisão, consequentemente mereceriam investimentos adequados a suas implementações.

Palavras-chave: Modelagem Hidrodinâmica; Derrame de Óleo; Baía de Paranaguá; SisBAHIA; ADIOS2;

RESUMEN

Los derrames de petróleo han significado una amenaza ambiental importante para las regiones costeras. Los equipos de contingencia de derrames bienen necesitando de herramientas de apoyo para realizar eficaz y eficientemente sus trabajos. Para este objetivo el modelaje hidrodinámico se presenta como una herramienta importante tanto de carácter operacional así como preventivo. Este trabajo implementa el modelo hidrodinámico SisBAHIA y el modelo de decaimiento del petróleo ADIOS2 en la bahía de Antonina-Paranaguá para posterior estudio en un derrame hipotético de 200 m³ en tres ecenarios hidrodinámicos, considerando como forzadores el viento, la marea y caudales de los ríos Nhundiaquara y Cachoeira, para la cuantificación de la dimensión, espesor, desplazamiento y sentido de la mancha de petróleo. También és calculado el decaimiento de la masa de petróleo en el transcurso de 5 días, considerando y sin considerar la acción del viento. Se concluye que los modelos son herramientas poderosas al auxilio de toma de decisión, consequentemente merecerian investimentos adecuados para sus implementaciones.

Palabras-clave: Modelagem Hidrodinâmica; Derrame de Óleo; Baía de Paranaguá; SisBAHIA; ADIOS2;

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A contaminação do ar, da água e do solo vem sendo uma preocupação mundial devido à degradação ambiental que a mesma gera. Entre as contaminações dos corpos d'água temos as ocasionadas por petróleo nos pontos de extração, na fuga dos oleodutos, por acidentes de barcos de transporte, ou nas refinarias. Como exemplos lamentáveis podem-se citar o derrame devido à ruptura de um tanque de armazenamento pertencente a Ashland Oil Company (15000 m^3) na Pensilvania, Estados Unidos; a colisão entre o petroleiro Estrella Pampeana da firma Shell e o cargueiro Sea Paraná, que causou o derrame de 5.300 m^3 de óleo na costa do Rio de la Plata, Argentina; o vazamento na Refinaria Presidente Getúlio Vargas da Petrobrás (REPAR) (4000 m^3) no estado do Paraná e o vazamento de um duto da Refinaria Duque de Caxias (REDUC) (500 m^3), no estado de Rio de Janeiro .

Um derrame de petróleo por menor que seja tem sempre conseqüências negativas. Estas conseqüências são principalmente ambientais e econômicas. A extensão dos efeitos de um acidente deste tipo depende de um conjunto de fatores agravantes, como por exemplo, o volume e propriedades do produto derramado, as condições meteorológicas durante o derrame (vento, agitação do mar, etc.), a época do ano, a sensibilidade do local, as medidas de combate implementadas, entre outras.

Quanto às conseqüências ambientais, tal como foi referido anteriormente, os derrames de petróleo põem em risco os habitats e ecossistemas, especialmente os mais sensíveis. Isto é particularmente grave quando são atingidas áreas protegidas, povoadas por fauna ou flora raras e em vias de extinção. Estes impactos podem também variar com o tipo de óleo e sua composição, e com a época do ano em que ocorre o acidente. Em termos gerais, podemos citar como algumas conseqüências para o ambiente, o fato de o petróleo impedir as trocas gasosas através da água e, infiltrar-

se em lençóis subterrâneos, destruindo plantas e animais. Além disso, a partir do material derramado, são libertados chumbo e outros metais pesados para a atmosfera, contaminando-a. Verificam-se também alterações nas radiações absorvidas (UV), aumentando a temperatura e reduzindo a luminosidade e síntese clorofílica. Poderá haver alteração do pH da água. Todas estas alterações nas propriedades da água podem conduzir ao desaparecimento de muitas espécies. A água adquire uma falsa aparência limpa, dado que fica cristalina pela morte do fitoplâncton e fauna marinha, os quais conferem uma aparência mais turva, ficando espaços livres que são ocupados por espécies melhor adaptadas às novas condições, ou espécies que se encontravam latentes, e que agora proliferam devido à falta de concorrência. A composição do petróleo condiciona fortemente a toxicidade – as diversas frações do óleo relacionam a sua toxicidade em curto prazo com os produtos destilados, em longo prazo com os produtos de ação lenta e de um modo indireto com os produtos degradados biologicamente (biodegradação) ou por processos físico-químicos (oxidação fotoquímica). Assim, nos produtos refinados a toxicidade é maior nos produtos com ponto de ebulição mais baixo, enquanto que nos óleos crus são as frações mais voláteis (que são mais solúveis na água) e os compostos aromáticos que são mais tóxicos. Estes compostos aromáticos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) apresentam diversas características nefastas, entre as quais o fato de serem mutagênicos (quanto maior a fração de PAH na constituição do petróleo cru, mais pronunciado este efeito), e carcinogênicos para os mamíferos, porque ativam metabolismos reativos no organismo. Os PAH têm capacidade de se acumularem nos sedimentos, nos seres vivos aquáticos e, em menor grau, na coluna de água. Óleos menos viscosos têm mais tendência para aderir a sedimentos, portanto se estes forem contaminados por hidrocarbonetos, a probabilidade de impactos em longo prazo aumenta consideravelmente. Os efeitos nos ecossistemas podem variar muito com a época do ano em que ocorre o acidente. Uma contaminação no Verão ou Primavera pode limitar fortemente o crescimento das plantas e a produção de sementes. Para a fauna, nos meses de Inverno podem ser vistos grandes grupos de aves migratórias

alimentando-se em estuários e zonas costeiras. Assim, nessas condições os efeitos de um derrame são consideravelmente maiores, ao contatarem diretamente com o produto os peixes sofrem dificuldades respiratórias e de locomoção, pois ficam presos na camada de petróleo e acabam por morrer. Muitas espécies têm, no entanto, quimiorreceptores que detectam o petróleo na água, logo migram para águas que não tenham sido atingidas (mais observado nos peixes de profundidade). A ingestão do petróleo provoca nos peixes lesões hepáticas. A exposição dos ovos ao petróleo causa, aumento da taxa de malformações, crescimento lento, diminuição da performance natatória. Nos mamíferos o produto combustível cola-se ao pêlo, impedindo-o de exercer a sua função termo reguladora. Como consequência, os animais entram em hipotermia. O petróleo também interfere no odor natural dos animais, impedindo o reconhecimento entre pais e filhos, que deixam assim de ser alimentados pelos pais. Ao verem-se com necessidade de ir à superfície respirar, os mamíferos marinhos sofrem um tamponamento das vias respiratórias, morrendo por asfixia. A exposição ao óleo provoca irritação das mucosas, principalmente da mucosa ocular. Os animais tentam permanecer o maior tempo possível submersos, originando-se perdas de resistência, que podem levar à desnutrição. A escassez de alimento resultante do desaparecimento de outros seres vivos também contribui para a desnutrição. A ingestão do óleo provoca, falhas hepáticas, destruição do epitélio intestinal, com conseqüente diminuição da absorção de nutrientes, desordens neurológicas, bioacumulação, principalmente dos PAH. Nas aves à medida que a plumagem fica impregnada de óleo, diminui a sua capacidade de repulsão da água, que penetra para debaixo das penas, retirando o ar aí aprisionado, que permite às aves flutuarem e regularem a temperatura corporal. Como consequência, por um lado, começam a afundar e afogam-se, e por outro, não conseguem manter a temperatura corporal constante e entram em hipotermia. Para se manterem quentes, aumentam rapidamente o seu metabolismo, levando a um esgotamento das reservas energéticas, e acabam por morrer. A ingestão de hidrocarbonetos (ao tentarem limpar as penas ou através de alimentos contaminados) provoca lesões no fígado e rins lesões no trato

gastrointestinal, levando à diminuição da absorção de nutrientes, mais crítica em aves jovens, que começam a apresentar atrasos de crescimento lesões nas glândulas adrenais, diminuição dos glóbulos vermelhos e anemia. O desaparecimento de peixes e plâncton faz com que diminua o alimento disponível e muitas aves morram de fome. Verifica-se uma redução da postura e eclosão dos ovos, porque, durante a incubação, o óleo nas penas das aves contaminadas deposita-se à superfície do ovo, matando o embrião. Nem os processos meticolosos de limpeza conseguem restaurar as condições respiratórias normais das aves, diminuindo a sua capacidade de movimentação e sobrevivência. Os mexilhões e outros moluscos que se fixam nas rochas e objetos, perdem a sua capacidade de aderência, caem e morrem. A ingestão de petróleo nos seres vivos, provoca bioacumulação, aumento da taxa respiratória, diminuição de assimilação de nutrientes, aumento da taxa de mortalidade. Estes efeitos são crônicos. Na flora estuarina os efeitos podem ser variáveis, dependendo do estágio de crescimento das plantas ou estação do ano. Destaca-se essencialmente o sufoco das zonas cobertas pela mancha, e o impacto provocado pela passagem de pessoal e equipamento. A restauração pode demorar 2 a 3 anos se a água for renovada e os nutrientes fornecidos.

Um dos fatores que pode assumir uma grande importância num derrame de petróleo são os prejuízos econômicos. As restrições na área afetada pelo derrame a navios comerciais, desportos aquáticos, pesca desportiva e comercial, exploração de portos e outras atividades podem trazer severas conseqüências na economia local, e atingir outras atividades. Nas atividades recreativas a contaminação de áreas costeiras é um fenômeno comum em muitos derrames, conduzindo a uma perturbação pública e interferência no turismo e algumas atividades recreativas e desportivas, tais como natação, pesca e mergulho, especialmente se o derrame ocorrer durante a temporada de veraneio. Os proprietários de hotéis e restaurantes, e outros que dependem do turismo poderão ser igualmente afetados. O distúrbio deste tipo de atividades, provocado por um derrame de óleo é de duração relativamente curta, e os efeitos no turismo são geralmente uma questão de restabelecer a confiança da população, assim que as

operações de limpeza estejam terminadas. Além do prejuízo para as companhias petrolíferas, pode-se salientar as indústrias que necessitam de um abastecimento contínuo de água do mar em boas condições. Refira-se o caso de centrais termoelétricas, que se podem ver obrigadas a diminuir o rendimento ou mesmo a parar completamente, caso se verifique a entrada de quantidades significativas de hidrocarbonetos para os tubos condensadores. Da mesma forma, podem ser afetadas estações dessalinizadoras. Os prejuízos relacionados à pesca são importantes, uma vez que os peixes desaparecem das zonas atingidas e, na maior parte das vezes, esta atividade é suspensa durante algum tempo. Os efeitos na aquicultura de crustáceos e moluscos também são enormes. As espécies filtradoras (como os moluscos) ingerem grande quantidade de hidrocarboneto podendo morrer ou convertendo-se em animais impróprios para consumo humano, com o conseqüente prejuízo para as pessoas que vivem da sua comercialização. Estes prejuízos tornam-se mais graves quando estas pessoas não têm outras fontes de renda e dependem destes recursos.

Os prejuízos podem abalar a confiança no mercado, visto que os consumidores podem mostrar receio em adquirir produtos afetados pelo acidente. Surgem assim restrições e punições à atividade pesqueira após o derrame, com o intuito de assegurar a confiança no mercado e proteger a pesca de peixes, crustáceos e mariscos contaminados. Um derrame de óleo pode ainda provocar danos diretos nas embarcações e respectivos motores usados na pesca.

A física, a química, a mecânica dos fluidos e, especialmente, a simulação numérica procuram contribuir através da quantificação dos processos fluido-dinâmicos e físico-químicos que acontecem quando o petróleo atinge os corpos d'água. A simulação numérica é uma importante ferramenta para o planejamento de operações de proteção e respostas rápidas a derrames. Um dos principais objetivos das simulações é a avaliação da trajetória seguida pelos derrames de petróleo, o que é de extrema importância em tarefas de combate à poluição e recuperação do petróleo derramado. O conhecimento da trajetória é também fundamental para a estimação de riscos potenciais, isto é, a determinação das áreas que poderiam ser atingidas no caso de

acontecer um derrame. Portanto, o conhecimento da trajetória seguida por um eventual derrame é de fundamental importância na hora de planejar rotas para navios tanque, pontos de carga e descarga de óleo, rotas de oleodutos, etc.. Um modelo para estimar trajetórias de derrames deveria fazer parte de qualquer plano de contingência de combate à poluição.

Destes fatos, surge a motivação do desenvolvimento deste trabalho que consiste em implementar um modelo hidrodinâmico e de transporte na parte interna da baía de Paranaguá para analisar as trajetórias possíveis de um derrame de petróleo de forma que o sistema sirva de apoio ao planejamento de operações iniciais de contingência e proteção.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a utilização da modelagem numérica de plumas de hidrocarbonetos na baía de Antonina-Paranaguá e suas limitações como sistema de apoio à tomada de decisão.

Como objetivo específico pode se descrever :

- Avaliar se o conjunto de dados primários disponíveis é suficiente para a implementação e calibração de um modelo hidrodinâmico.
- Colher as limitações e utilidades da modelagem hidrodinâmica aplicado ao estudo de plumas na região.
- Descrever as limitações das considerações sobre as massas de hidrocarbonetos usados no estudo de derrames.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estratégia para explorar o assunto proposto é refletido em uma organização através de oito capítulos.

Capítulo 1 – Introdução: onde se aborda as motivações e objetivos do

presente trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: aqui é feita uma revisão do estado da arte na modelagem matemática de problemas hidrodinâmicos, do transporte de escalares num fluido, métodos de resolução numerica dos modelos matematicos, propriedades e características do petróleo. A revisão às legislações nacionais e internacionais sobre medidas preventivas e corretivas de poluição por óleo no mar também são apresentadas neste capítulo

Capítulo 3 – Sistema Base de Modelos a ser Aplicado: neste capítulo se descrevem o modelo hidrodinâmico, o modelo de transporte de poluente e o modelo de decaimento do óleo, que serão utilizados nas simulações.

Capítulo 4 – Características da Região de estudo: capítulo em que é descrita a localização geográfica, clima, dinâmica hídrica, sedimento de fundo e principais rios da região de estudo.

Capítulo 5 – Dados do Complexo Estuarino Antonina Paranaguá: aqui são discriminados e citados os dados disponíveis para a implementação dos modelos.

Capitulo 6 – Implementação dos Modelos: neste capítulo é descrito a metodologia de implementação dos modelos na região de estudo, para prosseguir com a implementação até a calibração do modelo mediante o uso unicamente de maré astronômica .

Capitulo 7 – Simulação de Hidrodinâmica e Derrame de Petróleo: aqui são gerados três cenários usando como forçantes no primeiro cenario a maré astronômica, no segundo maré astronômica e vazões dos rios Nhundiaquara e Cachoeira e finalmente para o terceiro cenário maré astronômica, Vazões do rio Nhundiaquara, Cachoeira e vento.

Capítulo 8 – Conclusões: Com base nos resultados e os estudos feitos se descrevem limitações, considerações e observações, que se referem a modelagem da hidrodinâmica do corpo d'água e, o transporte e decaimento do óleo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema geral da mecânica de um sistema material consiste em determinar o estado de movimento ou de deformação, ao serem conhecidas às forças que atuam sobre ele. As forças que atuam em um elemento de fluido podem ser divididas convenientemente em 3 classes, chamadas forças de corpo, forças de superfície e forças de linha. As forças de corpo são aquelas que surgem “da ação à distância” sem um contato físico. Elas resultam da colocação de um corpo em um certo campo de força, o qual pode ser gravitacional, magnético, eletrostático, ou de origem eletromagnética. As Forças de superfície são aquelas que são exercidas na superfície do elemento pelo entorno através de contato direto. As forças de tensão superficial são chamadas forças de linhas. Elas aparecem na interface entre um líquido e um gás, ou entre dois líquidos imiscíveis. As forças de tensão superficial não aparecem diretamente na equação do movimento, mas entram somente nas condições de contorno.

A consideração simultânea de ditos efeitos leva a equação fundamental de Navier-Stokes que representa a equação de conservação da quantidade de movimento. Ditas equações junto com a equação da conservação da massa e da energia são as equações que descrevem o movimento do fluido sendo estas chamadas de equações primitivas. Os modelos matemáticos utilizados para descrever o movimento de um fluido são nada mais que simplificações aplicadas nas equações primitivas, pois a resolução total das equações primitivas não é possível com os conhecimentos atuais.

Segundo MALISKA (1995) para resolver o problema de movimento de um fluido a engenharia e a física têm a sua disposição, fundamentalmente, três ferramentas:

1. métodos analíticos (expressões matemáticas);
2. métodos numéricos (experimentação numérica); e
3. métodos experimentais (modelos físicos).

Os métodos analíticos e os numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam a resolução de modelos matemáticos. A diferença está na complexidade das equações do modelo que cada método pode resolver. Os métodos analíticos têm a desvantagem de ser aplicáveis apenas em problemas cujas hipóteses simplificadoras relacionadas com o comportamento do fluido o desviam demasiadamente do fenômeno físico real. Entre as simplificações temos a da incompressibilidade do fluido a qual é aplicável a líquidos assim como também aplicável no estudo de gases. No caso de fluidos notavelmente viscosos e de movimento muito lento, os efeitos da inércia resultam desprezíveis. Se não são considerados em absoluto, obtém-se fluxos idealizados aos quais dá-se o nome de laminares, e que são estudados com base em uma equação idealizada por Stokes. Pelo contrário, em fluidos muito pouco viscosos, pode-se desprezar a viscosidade, e tratá-los como fluidos não viscosos ou “perfeitos”. A teoria matemática destes fluidos perfeitos tem se desenvolvido com grande êxito na hidrodinâmica clássica, sendo a equação fundamental de Euler e, no caso da irrotacionalidade, a de Bernoulli (TANNEHILL et al., 1997).

Os métodos numéricos resolvem o modelo matemático mediante técnicas numéricas. Por sua vez podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com uma rapidez satisfatória. Os dados obtidos ou utilizados devem ser, entretanto confiáveis e este é um ponto de extrema importância a ser observado pelo analista (J. D. ANDERSON, 1995).

Os métodos experimentais são baseados em modelos físicos e experimentações em laboratório. Sua grande vantagem é o fato de tratar com a configuração real. Ela é, entretanto, de altíssimo custo e muitas vezes não pode ser realizada, por questões de segurança, ou pela dificuldade de reprodução das condições reais. Na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, muitas vezes é a única alternativa de que o projetista dispõe (ROSMAN, 2001).

2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRODINÂMICA

O movimento de fluidos é determinado por três princípios físicos fundamentais: conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia. As relações matemáticas que expressam estas leis, podem ser obtidas, considerando balanços de massa, momento e energia para um volume de controle infinitesimal no fluido.

Doravante será adotado um sistema de coordenadas cartesianas, denotando a velocidade na direção de x por u , na direção de y por v , na direção de z por w e a densidade por ρ , sendo que a velocidade e a densidade são função de (x, y, z) no espaço e do tempo (t) , adotando por convenção que u, v, w são positivos para as direções positivas de x, y, z .

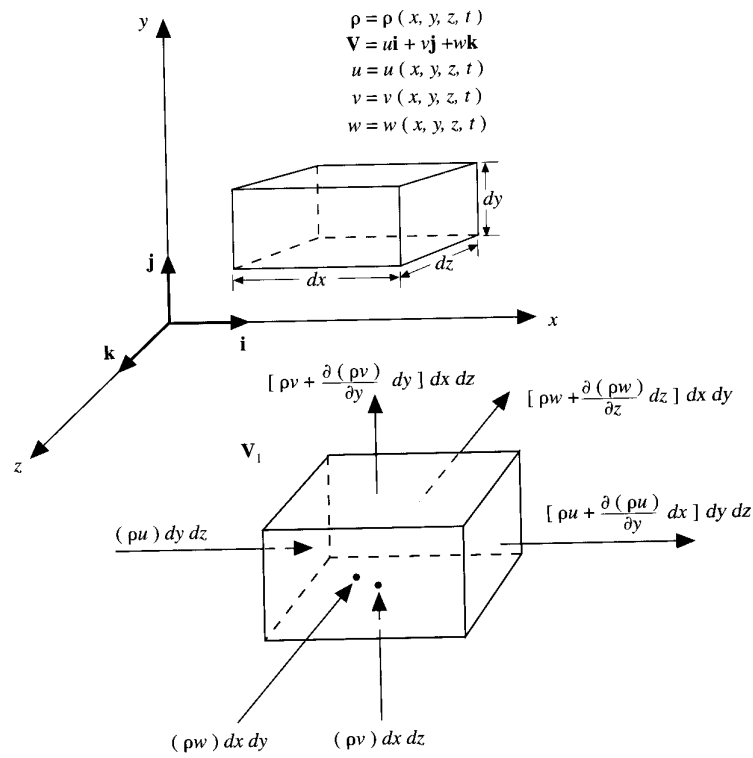
Considerando o modelo de fluxo da Figura 2.1 e aplicando o princípio de conservação da massa nesse volume de controle infinitesimal fixo no espaço e com o fluido movendo-se através dele tem se que:

Considerando as faces esquerda e direita do elemento que estão perpendiculares ao eixo x . A área destas faces é $dydz$. O fluxo de massa que passa pela face esquerda é $(\rho u)dydz$. Sendo a velocidade e a densidade funções da localização espacial, o fluxo de massa que passa através da face direita terá que ser diferente do que passa pela face esquerda. De fato, a diferença de fluxo de massa entre as duas faces é simplesmente $[\partial(\rho u)/\partial x]dx$. Assim o fluxo de massa pode ser expressado como $\{\rho u + [\partial(\rho u)/\partial x]dx\}dydz$. O fluxo de massa da face esquerda e direita é mostrado na Figura 2.1. Por analogia, o fluxo de massa que passa pelas faces do fundo e do topo, os quais são perpendiculares ao eixo y , são $(\rho v)dx dz$ e $\{\rho v + [\partial(\rho v)/\partial y]dy\}dx dz$, respectivamente. O fluxo de massa que passa pela face da frente e pela face de trás, as quais são perpendiculares ao eixo z , são $(\rho w)dx dy$ e $\{\rho w + [\partial(\rho w)/\partial z]dz\}dx dy$, respectivamente. Conseqüentemente, as setas na Figura 2.1 mostram as contribuições ao fluxo de entrada e ao fluxo de saída de massa através dos lados do elemento fixo. Se denotamos o fluxo de massa total de saída como uma

quantidade positiva temos o fluxo líquido de saída na direção de x dada pela equação (2.1):

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy dz - (\rho u) dy dz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz \quad (2.1)$$

FIGURA 2.1 - ELEMENTO DIFERENCIAL INFINITESIMAL FIXADO NO ESPAÇO COM DIAGRAMA DE FLUXO DE MASSA ATRAVÉS DAS VÁRIAS FACES DO ELEMENTO



fluxo total de saída na direção de y :

$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx dz - (\rho v) dx dz = \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz \quad (2.2)$$

fluxo total de saída na direção de z :

$$\left[\rho_w + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} dz \right] dx dy - (\rho_w) dx dy = \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} dx dy dz \quad (2.3)$$

Conseqüentemente, o fluxo de massa líquida de saída do elemento é dado pela equação (2.4)

$$\text{fluxo de massa líquida de saída} = \left[\frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.4)$$

A massa total do fluido no elemento infinitesimal é $\rho(dx dy dz)$; conseqüentemente a taxa de variação da massa com relação ao tempo é dado por

$$\text{taxa de variação da massa com relação ao tempo} = \frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz) \quad (2.5)$$

O princípio de conservação da massa, quando aplicado ao elemento fixo na Figura 2.1, pode ser escrito como segue: *a massa líquida de saída tem que ser igual à taxa de decrescimento da massa com relação ao tempo dentro do elemento.* Denotando a massa decrescente por uma quantidade negativa, esta afirmação pode ser expressa em termos das equações (2.4) e (2.5) como:

$$\left[\frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} \right] dx dy dz = - \frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.6a)$$

Na equação (2.6), o termo entre parênteses é simplesmente $\nabla \cdot (\rho V)$. Assim, a equação (2.6) fica

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.6b)$$

Esta é a equação da continuidade na sua forma de equação diferencial parcial.

Aplica-se outro princípio fundamental da física, chamado princípio da conservação do movimento ou segunda lei de Newton, num volume de controle infinitesimal que se move com o fluxo do fluido como se mostra na Figura 2.2. A segunda lei de Newton requer que a força líquida aplicada no elemento seja igual à aceleração da massa do elemento. Isto é uma relação vetorial, e será decomposta em três relações escalares ao longo dos eixos x , y e z . Considerando somente a componente x da segunda lei de Newton,

$$F_x = ma_x \quad (2.7)$$

onde F_x e a_x são as componentes escalares da força e a aceleração, respectivamente.

Considerando primeiramente o lado esquerdo da equação (2.7). As forças que atuam no volume infinitesimal podem ser divididas em dois termos:

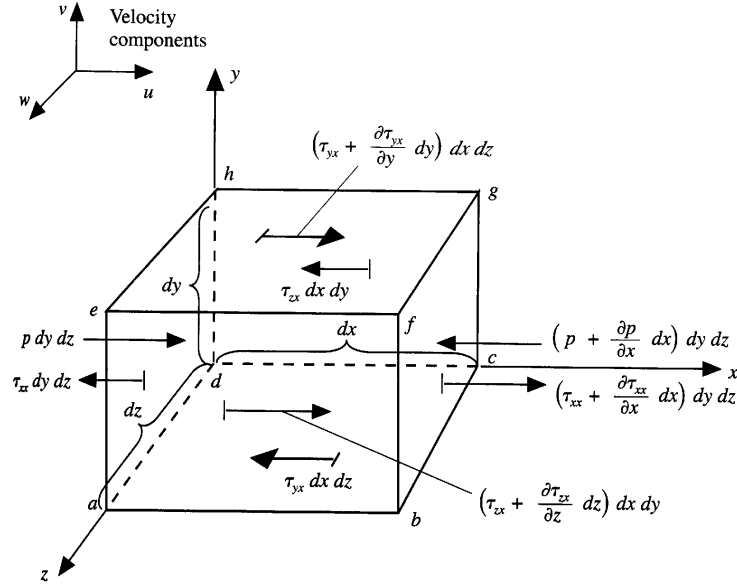
- 1) Forças de campo ou forças de corpo, as quais atuam diretamente na massa volumétrica do elemento de fluido.
- 2) Forças de contato ou forças de superfície, as quais atuam na superfície do elemento de fluido. Elas se devem a duas fontes : (a) a distribuição da pressão atuando na superfície, imposta pelo fluido ao redor do elemento de fluido, e (b) as tensões de corte e normal atuantes na superfície, também impostas pelo fluido ao redor.

Denotando as forças de corpo por unidade de massa atuando no elemento de fluido por f , com f_x como a sua componente em x . Sendo o volume do elemento de fluido ($dx dy dz$); conseqüentemente,

$$\text{Forças de corpo no elemento de fluido} = \rho f_x (dx dy dz) \quad (2.8)$$

atuando na direção x

FIGURA 2.2 - ELEMENTO DIFERENCIAL COM DISCRETIZAÇÃO DAS FORÇAS NA DIREÇÃO x



As tensões normais e de corte em um fluido estão relacionados à taxa de deformação do elemento de fluido. De acordo com o esboçado na Figura 2.2 podemos escrever

$$\begin{aligned} \text{FLS}_x = & \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy dz + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dy dz + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz \\ & + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \end{aligned} \quad (2.9)$$

onde FLS_x = força líquida de superfície na direção x .

A força total F_x na direção de x é dada pela soma das equações (2.8) e (2.9).

Adicionando e cancelando termos, obtemos

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad (2.10)$$

A equação (2.10) representa o lado esquerdo da equação (2.7), recordando que a massa do elemento de fluido é fixo e é igual a

$$m = \rho dx dy dz \quad (2.11)$$

Também, recordando que a aceleração do elemento de fluido é igual a taxa de variação da velocidade com relação ao tempo, conseqüentemente, a componente da aceleração na direção de x , denotada por a_x , é simplesmente a taxa de variação de u com relação ao tempo; desde que estejamos seguindo o movimento de um elemento de fluido, esta taxa de variação com relação ao tempo é dado pela derivada substantiva (material ou total), material ou total. Assim

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (2.12)$$

Combinando as equações (2.7) e (2.10) em (2.12), obtemos;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.13.a)$$

a qual é a componente x da equação de conservação do movimento para um fluido viscoso. Da mesma maneira, as componentes y e z podem ser obtidas como;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.13 b)$$

e

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.13 c)$$

Estas equações são chamadas equações de Navier-Stokes e podem ser obtidas para um elemento diferencial de fluido, fixo no espaço manipulando as equações anteriores. Escrevendo a parte esquerda da equação (2.13a) em termos de derivada substantiva, temos;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho V \cdot \nabla u \quad (2.14)$$

Também, expandindo a seguinte derivada,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.15)$$

e operando com ela obtemos

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.16)$$

Recordando a identidade vetorial para a divergência do produto de um escalar por um vetor, temos;

$$\nabla \cdot (\rho u V) = u \nabla \cdot (\rho V) + (\rho V) \cdot \nabla u \quad (2.17)$$

ou

$$\rho V \cdot \nabla u = \nabla \cdot (\rho u V) - u \nabla \cdot (\rho V) \quad (2.18)$$

Substituindo as equações (2.16) e (2.18) em (2.15)

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) + \nabla \cdot (\rho u V) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \right] \quad (2.19)$$

O último termo entre chaves na equação (2.19) é simplesmente o lado esquerdo da equação da continuidade na equação (2.6); conseqüentemente o termo entre parênteses é zero. Assim a equação (2.19) se reduz a

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \quad (2.20)$$

Substituindo a equação (2.20) em (2.13a)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.21a)$$

Similarmente, as equações (2.13b) e (2.13c) podem ser expressas como:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.21b)$$

e

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.21c)$$

as equações (2.21a) a (2.21c) são as equações de Navier-Stokes para um elemento diferencial de fluido fixo no espaço. Para fluidos Newtonianos Stokes obteve

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla V) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.22a)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla V) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.22b)$$

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla V) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.22c)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (2.22d)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (2.22e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (2.22f)$$

Onde μ é o coeficiente de viscosidade molecular e λ é o segundo coeficiente de viscosidade. Stokes fez a hipótese que

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (2.23)$$

o qual é freqüentemente usado mas que até o dia de hoje não foi definitivamente confirmado (ANDERSON, 1995).

Substituindo as equações (2.22) nas equações (2.23) obtemos as equações completas de Navier-Stokes para um elemento infinitesimal de fluido fixo no espaço.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} \\ & + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]}{\partial z} + \rho f_x \end{aligned} \quad (2.24a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right)}{\partial y} \\ + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]}{\partial z} + \rho f_y \end{aligned} \quad (2.24b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \quad (2.24c)$$

Aplicando o princípio da conservação da energia, que nada mais é do que a primeira lei da termodinâmica, num elemento infinitesimal de fluido, manifesta-se que:

<i>A taxa de variação</i>		<i>Fluxo líquido</i>		<i>Taxa de trabalho feita no</i>
<i>de energia dentro de</i>	<i>=</i>	<i>de calor no</i>	<i>+</i>	<i>elemento devido às forças</i>
<i>um elemento de fluido</i>		<i>elemento</i>		<i>de corpo e de superfícies</i>

ou

$$A = B + C \quad (2.26)$$

Onde A, B e C denotam os termos respectivos acima.

Fazendo a avaliação de C, isto é, obtendo uma expressão para a taxa de variação devido às forças de corpo e de superfície, a taxa de trabalho feito por uma força exercida em um corpo em movimento é igual ao produto da força e a

componente da velocidade na direção da força. Conseqüentemente a taxa de trabalho feita pelas forças de corpo, atuantes no elemento infinitesimal de fluido em movimento com a velocidade V é

$$\rho f \cdot V(dx dy dz) \quad (2.27)$$

Na análise da taxa de trabalho das forças de superfície (pressão mais cisalhamento e tensões normais), consideraremos as forças na direção x , mostrado na Figura 2.2, a taxa de trabalho feito no elemento de fluido em movimento pela pressão e forças de corte na direção x é simplesmente a componente x da velocidade, u , multiplicada pelas forças, por exemplo, na face $abcd$ a taxa de trabalho feita por $\tau_{yx} dx dz$ é $u \tau_{yx} dx dz$, com similar expressão para as outras faces. Para enfatizar estas considerações de energia, o elemento de fluido em movimento é redesenhado na Figura 2.3, onde a taxa de trabalho feita em cada face pelas forças de superfície na direção x é mostrada explicitamente. Para obter a taxa líquida de trabalho feito no elemento de fluido pelas forças de superfície, observe que as forças na direção positiva de x fazem trabalho positivo e as forças com direção negativa de x fazem trabalho negativo. Conseqüentemente, comparando as forças de pressão na face $adhe$ e $bcbf$ na Figura 2.3, a taxa líquida de trabalho feita pela pressão na direção x é

$$\left[up - \left(up + \frac{\partial(up)}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = - \frac{\partial(up)}{\partial x} dx dy dz \quad (2.28)$$

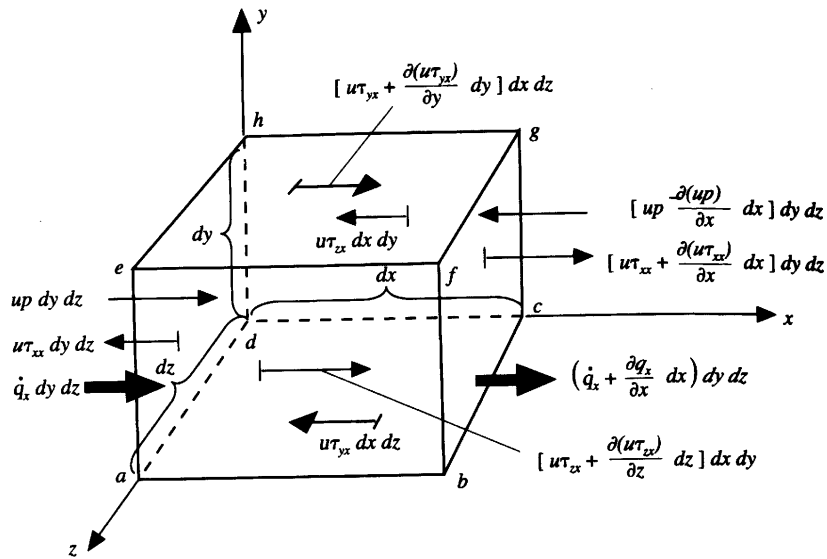
similarmente, a taxa líquida de trabalho feita pelas tensões de cisalhamento na direção x nas faces $abcd$ e $efgh$ é

$$\left[u \tau_{yx} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} dy - u \tau_{yx} \right] dx dz = \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} dx dy dz \quad (2.29)$$

Considerando todas as forças de superfície mostradas na Figura 2.3, a taxa líquida de trabalho feito por estas forças no elemento de fluido em movimento é simplesmente;

$$\left[-\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.30)$$

FIGURA 2.3 - FLUXO DE ENERGIA ASSOCIADO A UM ELEMENTO INFINITESIMAL



A expressão anterior considera somente as forças de superfície na direção x . Quando as forças superficiais na direção y e z são também incluídas, expressões similares são obtidas. No total, a taxa líquida de trabalho no elemento de fluido em movimento é a soma das contribuições das forças de superfície nas direções de x , y e z , assim como também a contribuição de forças de corpo. Isto é denotado por C na equação (2.26) e é dado por

$$C = - \left[\left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \Big] dx dy dz \\
& + \rho f \cdot V dx dy dz
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Note que na equação (2.31) os primeiros três termos à direita são simplesmente $\nabla \cdot (pV)$.

Concentrando a nossa atenção no termo B da equação (2.26), este é o fluxo líquido de calor no elemento. Este fluxo de calor é devido à (1) aquecimento volumétrico como a absorção ou emissão de radiação e (2) transferência de calor através da superfície devido ao gradiente de temperatura, isto é condução térmica. Definindo Φ como a taxa de adição de calor volumétrico por unidade de massa, notando que a massa do elemento de fluido em movimento na Figura 2.3 é $\rho dx dy dz$, obtemos

$$\text{Aquecimento volumétrico do elemento} = \rho \Phi dx dy dz \tag{2.32}$$

Na Figura 2.3, o calor transferido por condução no elemento de fluido através da face *adhe* é $\Phi_x dy dz$, onde Φ_x é o calor transferido na direção de x por unidade de tempo por unidade de área pela condução térmica. O calor transferido em uma direção dada, quando expresso em dimensões de energia por unidade de tempo por unidade de área perpendicular a direção, é chamado fluxo de calor naquela direção. Aqui, Φ_x é o fluxo de calor na direção de x . O calor transferido para fora do elemento através da face *bcgf* é $\left[\Phi_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx \right] dy dz$. Assim, o calor líquido transferido na direção x no elemento de fluido por condução é

$$\left[\Phi_x - \left(\Phi_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = - \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx dy dz \tag{2.33}$$

Tomando em conta a transferência de calor nas direções de y e z através das

outras faces da Figura 2.3, obtemos;

$$\begin{array}{l} \text{Aquecimento de um} \\ \text{elemento de fluido por} \\ \text{condução térmica} \end{array} = - \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial \phi_z}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.34)$$

O termo B na equação (2.26) é a soma da equação (2.32) e (2.34)

$$B = \left[\rho \phi - \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial \phi_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (2.35)$$

O fluxo de calor devido à condução, pela lei de Fourier da condução de calor, é proporcional ao gradiente local de temperatura:

$$\phi_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \phi_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad \phi_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

onde k é a condutividade térmica. Consequentemente, a equação (2.35) pode ser escrita;

$$B = \left[\rho \phi + \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.36)$$

Finalmente o termo A na equação (2.26) denota a taxa variação de energia no elemento de fluido. O elemento de fluido tem duas contribuições para a sua energia:

1. A energia interna devido ao movimento molecular aleatório, e (por unidade de massa).
2. A energia cinética devido ao movimento translacional do elemento de fluido. A energia cinética por unidade de massa é simplesmente $V^2/2$.

Conseqüentemente, o elemento de fluido em movimento tem ambas energias cinética e interna; a soma destas duas é a energia “total”. Na equação (2.26), a energia no termo A é a energia total isto é a soma da energia cinética e interna. A energia total é $e + V^2/2$. Desde que estejamos seguindo um elemento de fluido em movimento, a taxa de tempo de mudança de energia total por unidade de massa é dada pela derivada substantiva. Sendo a massa do elemento de fluido $\rho dx dy dz$, temos

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy dz \quad (2.37)$$

A forma final da equação da energia é obtida por substituição das equações (2.31), (2.36) na equação (2.23), obtemos;

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = & \rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (2.38)$$

A equação (2.38) é a equação da energia para um elemento infinitesimal de fluido em movimento. O lado direito da equação envolve a derivada substantiva da energia total $D(e + V^2/2)/Dt$. Esta é uma das muitas formas da equação da energia.

Para expressar o lado esquerdo da equação em termos de e , multiplicaremos a equação (2.13.a), (2.13.b) (2.13.c) por u , v , e w , respectivamente

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{u^2}{2} \right) = -u \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + u \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + u \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho u f_x \quad (2.38)$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{v^2}{2} \right) = -v \frac{\partial p}{\partial y} + v \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + v \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + v \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho v f_y \quad (2.39)$$

$$\rho \frac{D\left(\frac{w^2}{2}\right)}{Dt} = -w \frac{\partial p}{\partial z} + w \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + w \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + w \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho u f_w \quad (2.40)$$

Adicionando as equações (2.38), (2.39), (2.40) e notando que $u^2 + v^2 + w^2 = V^2$ obtemos

$$\begin{aligned} \rho \frac{DV^2}{Dt} = & -u \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial y} - w \frac{\partial p}{\partial z} + u \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ & + v \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ & + \rho (u f_x + v f_y + w f_z) \end{aligned} \quad (2.41)$$

Subtraindo a equação (2.41) de (2.38), e notando que $\rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} = \rho (u f_x + v f_y + w f_z)$ temos

$$\begin{aligned} \rho \frac{De}{Dt} = & \rho \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right. \\ & \left. + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

A equação (2.42) é uma forma da equação da energia onde a derivada substantiva no lado esquerdo é estritamente em termos da energia interna.

Procedendo agora para encontrar a equação da conservação da energia para um elemento infinitesimal fixo no espaço, em termos da energia total $e + V^2/2$, aplicando o conceito de derivada substantiva temos;

$$\rho \frac{D\left(e + \frac{V^2}{2}\right)}{Dt} = \rho \frac{\partial\left(e + \frac{V^2}{2}\right)}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \left(e + \frac{V^2}{2}\right) \quad (2.43)$$

Porém

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right]}{\partial t} &= \rho \frac{\partial \left(e + \frac{V^2}{2} \right)}{\partial t} + \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial \left(e + \frac{V^2}{2} \right)}{\partial t} &= \frac{\partial \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right]}{\partial t} - \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Da identidade vetorial concernente ao divergente de um produto escalar por um vetor,

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] &= \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \\ \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \left(e + \frac{V^2}{2} \right) &= \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] - \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \end{aligned} \quad (2.45)$$

substituindo a equação (2.45) e (2.44) em (2.43):

$$\rho \frac{D\left(e + \frac{V^2}{2}\right)}{Dt} = \frac{\partial \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right]}{\partial t} - \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] \quad (2.46)$$

O segundo termo entre colchete do lado direito da equação (2.46) é igual a

zero, da equação da continuidade de acordo a equação (2.6), assim a equação (2.46) passa a ser:

$$\rho \frac{D\left(e + \frac{V^2}{2}\right)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] \right] \quad (2.47)$$

Substituindo a equação (2.47) no lado esquerdo da equação (2.38)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} \end{aligned} \quad (2.48)$$

A equação (2.48) é a equação da conservação da energia para um elemento diferencial fixo no espaço, escrito em termos da energia total.

As equações deduzidas até aqui foram baseadas nas leis físicas de conservação do movimento, da massa e da energia e agrupando-as temos:

Para a conservação do momento na direção de x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} \\ + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]}{\partial z} + \rho f_x \end{aligned} \quad (2.24a)$$

Para a conservação do momento na direção de y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right)}{\partial y} \\ + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]}{\partial z} + \rho f_y \end{aligned} \quad (2.24b)$$

Para a conservação do momento na direção de z :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \quad (2.24c)$$

Para a conservação da massa temos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.6)$$

Para a conservação da energia temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] = \rho \Phi + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} \\ + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (2.48)$$

Este conjunto de equações constitui as equações primitivas. A natureza dinamicamente instável do escoamento turbulento e as limitações analíticas e numéricas para a resolução do problema geral exigem a introdução de hipóteses simplificadoras, baseadas em argumentos de natureza física, que tornam possível a obtenção de uma solução. Têm-se assim vários modelos matemáticos da hidrodinâmica baseados em simplificações das equações primitivas porém com aplicabilidade restringida devido a características das simplificações assumidas no modelo.

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSPORTE

Uma vez que seja introduzida a substância contaminante no meio receptor, esta é transportada, dispersada, e no caso, decaída em função das próprias características da mesma e das condições hidrodinâmica da zona. O sistema de transporte pode ser dividido em duas categorias a advecção e a difusão.

A advecção move o contaminante devido ao fluxo do fluido enquanto a difusão é dada pela mistura do contaminante por movimento aleatório do fluido. Em escala microscópica a difusão ocorre como difusão molecular resultante do movimento aleatório browniano das partículas do fluido, um movimento aleatório similar ocorre em escalas maiores devido a remoinhos e é chamada de difusão turbulenta. Ambos tem a tendência de minimizar os gradientes (isto é, diferenças em concentração) mediante movimento de massa de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração.

Existem numerosos modelos matemáticos que resolvem o problema mas não deve perder-se de vista o fato de que, em geral, a variação da concentração dos contaminantes depende, na maior parte dos casos, mais da advecção do que da dispersão, pelo qual é mais importante dispor de modelos hidrodinâmicos mais realísticos do que modelos de dispersão muito sofisticados (LEITÃO, 1996).

Para formular a equação de transporte para uma substância passiva não

conservativa iniciaremos pelo enunciado da lei de Fick a qual afirma que o fluxo de massa de uma substância dissolvida na água é proporcional ao gradiente de concentração, traduz-se matematicamente pela seguinte equação:

$$q = -D \nabla c \quad (2.49)$$

Representando q o vetor fluxo de massa por unidade de área com as componentes (q_x, q_y, q_z) , D o coeficiente de proporcionalidade ou coeficiente de difusão e c a concentração num ponto x, y, z .

Se pensarmos num volume elementar onde c é constante e o fluxo difusivo ao longo da superfície é uniforme e em seguida fizermos tender o volume para um ponto obtemos:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c \quad (2.50)$$

O coeficiente de difusão molecular D é dependente de diversos fatores dos quais se destacam o tipo de fluido, o tipo de substância dissolvida, a temperatura e a pressão. O seu valor na água é da ordem de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. A equação (2.50) é conhecida pela equação de difusão molecular num meio em repouso. Quando um fluido se encontra em movimento, existe o fluxo adicional de massa, devido ao transporte advectivo, que é contabilizado acrescentando à equação da difusão o termo $\nabla(u \cdot c) = u \nabla c + c \nabla \cdot u$. No caso de um fluido incompressível, a divergência da velocidade é nula ficando a equação do transporte na forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \nabla c = D \nabla^2 c + F - P \quad (2.51)$$

Sendo u o vetor de velocidade com as componentes (u, v, w) , F o termo fonte

(ex: emissão de um poluente) e P o termo sumidouro (ex: consumo do poluente por organismos). Esta é a equação de transporte de uma substância passiva não conservativa diluída em um fluido em termos de velocidades e concentrações instantâneas.

Os valores de velocidade, num escoamento turbulento, apresentam flutuações com um comportamento caótico quer no espaço, quer no tempo. Estas flutuações devem-se a uma complicada estrutura de vórtices de diferentes dimensões, que se formam num fluido quando as forças viscosas perdem importância face às forças de inércia (números de Reynolds elevados). No caso do escoamento num tubo cilíndrico o escoamento é turbulento se $R_E > 2000$. No ambiente marinho (estuários e oceanos) o número de Reynolds é da ordem de $10^5 - 10^8$, sendo o escoamento normalmente turbulento. Num escoamento turbulento, a velocidade não é a única propriedade característica que apresenta flutuações aleatórias. Todas as propriedades hidrodinâmicas (ex: pressão, densidade) e termodinâmicas (ex: temperatura) apresentam esse comportamento. A determinação exata, considerando as escalas espaciais da mecânica de fluidos, de qualquer das propriedades referidas num determinado instante e num determinado ponto, é uma tarefa só possível de resolver, com aplicação de modelos hidrodinâmicos com passos espaciais e temporais suficientemente pequenos, de modo a serem resolvidos explicitamente, os termos turbulentos. As escalas referidas teriam que ser inferiores às micro-escalas de Kolmogorov ($\tau \equiv (\nu/\epsilon)^{1/2}$ e $\eta \equiv (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ - TENNEKESE, 1972), isto é, às dimensões dos vórtices menores, presentes nos escoamento turbulentos. As micro-escalas referidas tomam os valores de $\tau=1$ s e $\eta=1$ cm para os valores característicos de $\nu \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\epsilon \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$. Com os meios computacionais atualmente disponíveis é impossível a aplicação prática de modelos hidrodinâmicos com passos temporais e espaciais suficientemente pequenos de modo a resolver estas escalas ($dt < \tau$ e $dx < \eta$) (LEITÃO, 1996).

Verifica-se que os valores de concentração de qualquer substância dissolvida num meio turbulento, semelhante às propriedades hidrodinâmicas e termodinâmicas,

também apresentam uma flutuação aleatória. Visto que a determinação exata de um campo de velocidades, ou de um campo de escalares ϕ , (ex: Salinidade, Temperatura, concentração de coliformes) dum fluido, no espaço e no tempo, é uma tarefa de execução prática quase impossível e na maioria das vezes desnecessária, é então necessário aplicar uma metodologia que permita dividir estas num termo médio $(\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}, \bar{\phi})$ e num termo aleatório (u', v', w', ϕ') com um determinado comportamento estatístico. A esta metodologia chama-se decomposição de Reynolds. Aplicando esta metodologia à equação de transporte de uma propriedade escalar ϕ , equação (2.51), obtêm-se:

$$\frac{\partial(\bar{\phi} + \phi')}{\partial t} + (U + u') \frac{\partial(\bar{\phi} + \phi')}{\partial x} + (V + v') \frac{\partial(\bar{\phi} + \phi')}{\partial y} + (W + w') \frac{\partial(\bar{\phi} + \phi')}{\partial z} = D\nabla^2(\bar{\phi} + \phi') + F - P \quad (2.52)$$

Sabendo que:

1. $\bar{\bar{f}} = \bar{f}$
2. $\overline{(f + g)} = \bar{f} + \bar{g}$
3. $\overline{f'f'} > 0$ se $f' \neq 0$
4. $\overline{f'g'} = 0$ f' g' funções independentes
5. $\frac{\partial \bar{f}}{\partial s} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial s}$
6. $\overline{\int f ds} = \int \bar{f} ds$
7. $\overline{af} = a\bar{f}$, $a = \text{constante}$
8. $\overline{fg} = \bar{f}\bar{g}$

e aplicando a definição de valor médio à equação 2.52 obtém-se a equação (2.53)

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} + V \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} + W \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} = D\nabla^2 \bar{\phi} + F - P - \frac{\partial(\overline{u'\phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'\phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'\phi'})}{\partial z} \quad (2.53)$$

Os últimos três termos do lado direito da equação representam a natureza turbulenta do escoamento. Eles descrevem o transporte de uma substância dissolvida pelas flutuações das velocidades e das concentrações em torno dos seus valores médios.

Os termos $\overline{u'\phi'}, \overline{v'\phi'}, \overline{w'\phi'}$ da equação (2.53) (fluxos turbulentos) são desconhecidos o que levanta o problema de fechamento desta equação. Taylor em 1915 apresentou, para um caso unidimensional, uma solução para este problema. Propôs, por analogia com a lei de Fick, que os fluxos turbulentos fossem proporcionais ao gradiente de concentrações médio. Generalizando para um caso tridimensional, fica:

$$\overline{u'_i \phi'} = -K_{ij} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \quad (2.54)$$

u'_i - velocidade aleatória segundo a direção $i=1,2,3$;

x_j - coordenada cartesiana $j=1,2,3$;

K_{ij} - tensor dos coeficientes de difusão turbulenta (tensor de segunda ordem).

Ao contrário da difusão molecular, os nove componentes do tensor dos coeficientes de difusão turbulenta, K_{ij} , não dependem do fluido, mas sim das características do escoamento sendo, função do espaço e do tempo. Substituindo (2.54) na equação (2.55), obtém-se:

$$\begin{array}{ccccccccc} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} & + & U_i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} & = & D \nabla^2 \bar{\phi} & + & \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) & + & F - P \\ [1] & & [2] & & [3] & & [4] & & [5] \end{array} \quad (2.55)$$

[1] - Taxa de variação do valor médio propriedade escalar ϕ num ponto;

[2] - Advecção pelo campo médio;

- [3] - Difusão molecular;
- [4] - Difusão turbulenta;
- [5] - Fontes e Sumidouros.

Esta equação é o ponto de partida de todos os modelos matemáticos de transporte. A simplificação mais comum consiste em desprezar o termo (3), visto a difusão molecular, na maioria das aplicações, ser várias ordens de grandeza inferior à difusão turbulenta. Outra das simplificações está relacionada com o tensor K_{ij} ; por ser extremamente difícil determinar as nove componentes deste tensor. É natural assumir-se que o tensor de coeficientes de difusão turbulenta é simétrico, $K_{ij}=K_{ji}$. Ficando assim, o número de componentes reduzido a seis. No meio marinho pode-se assumir que há isotropia horizontal. Esta hipótese baseia-se no fato de as escalas características, horizontais e verticais, serem muito diferentes ($L_{\text{Horizontal}} \approx 1000 \times L_{\text{Vertical}}$) o que faz com que a difusão turbulenta, vertical e horizontal, difiram muito em intensidade. Esta diferença intensifica-se nos escoamentos estratificados. Caso todas as simplificações apresentadas possam ser admitidas, o tensor passa de nove valores para dois, que se designam por: coeficiente de difusão horizontal, $K_{11}=K_{22}$, e coeficiente de difusão vertical, K_{33} . Torna-se assim possível, num vasto leque de situações, caracterizar os processos difusivos com apenas dois coeficientes de difusão turbulenta ($K_{\text{horizontal}}$ e K_{vertical}) (OZMIDOV, 1990).

2.3 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS MATEMÁTICOS

A resolução numérica de um modelo matemático consiste na discretização, é o processo pelo qual uma expressão matemática fechada, como uma função ou uma equação diferencial ou integral envolvendo funções, os quais são vistos como um contínuo infinito de valores através de um domínio, é aproximado através de expressão análoga o qual prescreve valores somente a um numero finito de pontos ou volumes

discretizados no domínio. Uma solução do modelo matemático pode ser uma expressão fechada a qual dá a variação das variáveis dependentes continuamente através do domínio, isto é a solução analítica. Em contraste, as soluções numéricas podem dar soluções em pontos discretizados no domínio, chamado malha de pontos.

Os métodos numéricos mais utilizados na resolução dos modelos matemáticos da dinâmica dos fluidos são os das diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos (FERZINGER, 2002).

2.3.1 Método das Diferenças Finitas

Este é o método mais antigo para a resolução numérica de equações diferenciais parciais, acredita-se ter sido introduzido por Euler no século XVIII. É também o mais fácil método usado para geometrias simples.

No método das diferenças finitas as equações diferenciais originais são aproximadas por equações algébricas, onde figuram como variáveis os valores da solução em pontos discretos do espaço. A solução exata, de natureza contínua, é assim aproximada por uma solução discreta, conhecida apenas em alguns pontos do domínio. O domínio de cálculo deve por isso ser dividido usando-se uma malha. As linhas de malha servem como linhas de coordenadas locais.

A discretização das equações é obtida termo a termo por aplicação direta de operadores de diferenças finitas às derivadas que os compõem. Estes operadores são normalmente obtidos recorrendo à expansão em série de Taylor da solução numérica nos pontos da malha (HIRSCH, 1988)

2.3.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos usa a forma integral das equações de conservação como ponto de partida. O domínio de calculo é dividido em um numero finito de volumes de controles contínuos, e as equações de conservação são aplicadas para cada volume de controle. No centróide de cada volume de controle existe um

nodo computacional no qual os valores da variável têm que ser calculados. A interpolação é usada para expressar os valores das variáveis na superfície do volume de controle em termo dos valores nodais. As integrais de volume e superfície são aproximadas usando formulação de quadratura. Como resultado obtém-se equações algébricas para cada volume de controle (TANNEHILL et al., 1997).

O método de volumes finitos pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, e aplicáveis a geometrias complexas. A malha define unicamente os limites dos volumes de controle e não necessita ser relacionado a um sistema de coordenadas. O método é conservativo por construção (VINOKUR, 1989).

O método de volumes finitos é talvez o mais simples de entender e de programar. Todos os termos que precisam ser aproximados têm significado físico o qual é o porque da sua popularidade com os engenheiros.

A desvantagem do método de volumes finitos comparados com o método de diferenças finitas é que métodos de ordem maior que o segundo são mais difíceis de desenvolver em 3D. Isto é devido ao fato de que as aproximações do método de volumes finitas requerem dois níveis de aproximação: interpolação e integração.

2.3.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é similar ao método dos volumes finitos de varias maneira. O domínio de calculo é composto por um conjunto de volumes discretos ou elementos finitos que são geralmente não estruturados; em 2D eles são usualmente triângulos ou quadriláteros, enquanto em 3D tetraedros ou hexaedros são usados freqüentemente. A característica que se distingue no método de elementos finitos é que as equações são multiplicadas por uma função de peso antes de serem integradas no domínio inteiro. Nos métodos de elementos finitos mais simples, a solução é aproximada por uma função de forma linear dentro de cada elemento de maneira a garantir a continuidade da solução através das fronteiras do elemento. Tal função pode ser construída de seus valores aos cantos dos elementos. A função de

peso é da mesma forma.

Esta aproximação é logo substituída na integral de peso da conservação e a equação a ser resolvida e obtida requerendo que a derivada da integral com respeito a cada valor nodal seja zero; isto corresponde selecionar a melhor solução dentro do conjunto das funções permitidas. O resultado é um conjunto de equações algébricas não lineares.

Uma importante vantagem do método de elementos finitos é a habilidade de trabalhar com geometrias arbitrárias; Existe uma ampla literatura para maior detalhe do método de elementos finitos e suas aplicações para as equações de Navier-Stokes ver ODEN (1972), ZINKIEWICS (1977), CHUNG (1978), BAKER (1983), GIRAULT e RAVIART (1986) ou FLETCHER (1991).

2.4 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO

O petróleo é uma mistura líquida complexa de diversos compostos, entre os quais oxigênio, cloro, enxofre, vanádio, níquel, sais minerais, etc. Contudo, a grande maioria (cerca de 75%) dos compostos do petróleo é hidrocarbonetos. “Hidrocarbonetos” ou óleos são termos usualmente utilizados para se referirem ao petróleo sob qualquer forma, incluindo o petróleo bruto, seus derivados pesados (crus) e produtos refinados (SPEIGHT, 1997).

2.4.1 Composição Química

Os petróleos crus diferem bastante na sua composição, podendo apresentar uma ampla gama de propriedades, enquanto que os produtos refinados são controlados, sendo muitas vezes enriquecidos com determinados compostos, como as olefinas que se formam durante o processo de craqueamento. Assim, os produtos refinados passam a ter características bem definidas.

Os hidrocarbonetos podem ser agrupados em cinco categorias diferentes, de acordo com a sua composição química: alcanos, naftenos, aromáticos, alcenos e

asfaltenos (JOKUTY et al., 1999).

Os alcanos são hidrocarbonetos estáveis e saturados que apresentam ligações C-C simples, com a estrutura-tipo C_nH_{2n+2} . São também conhecidos por parafinas, sendo os principais constituintes do petróleo.

Os naftenos são também compostos orgânicos saturados, contudo apresentam terminais ligados numa estrutura anelar, sendo a sua fórmula geral: C_nH_{2n} . São insolúveis em água.

Os hidrocarbonetos saturados (tanto os alcanos quanto as naftenos) de menor peso molecular ($C < 18$) são os componentes mais passíveis de dispersão dos óleos, enquanto que as maiores moléculas saturadas (ceras) podem provocar anomalias nos processos de evaporação, dispersão e emulsificação.

Os compostos orgânicos aromáticos são caracterizados por possuírem pelo menos um anel benzênico na sua estrutura. Os pequenos aromáticos (um ou dois anéis) são solúveis na água, sendo também de evaporação rápida, ao contrário dos maiores aromáticos que não apresentam nenhuma das características referidas anteriormente.

Os aromáticos de baixo ponto de ebulição são responsáveis pela toxicidade da maior parte dos óleos, sendo os aromáticos de elevado ponto de ebulição suspeitos de provocarem câncer e de serem contaminantes persistentes.

Os alcenos são compostos não-saturados, que possuem pelo menos uma ligação dupla entre átomos de carbono, com a seguinte fórmula geral: C_nH_{2n} . Estes compostos encontram-se nos produtos refinados.

Os asfaltenos são compostos com elevados pesos moleculares e definição imprecisa. Contêm S, N e O, podendo também estar associados a metais como o Níquel e Cádmio. Não sofrem evaporação, degradação ou dispersão significativas, contribuindo para a formação de emulsões água-óleo estáveis quando em percentagens superiores a 3 %.

O conteúdo de enxofre num petróleo bruto é importante por diversas razões. Processos como o craqueamento catalítico e a refinação são afetados por elevados conteúdos de enxofre. Durante um derrame de óleo, o conteúdo de enxofre torna-se

uma preocupação para o pessoal da limpeza, por questões de saúde e segurança. Adicionalmente, a queima de óleos com elevado conteúdo sulfuroso pode liberar níveis perigosos de SO_2 (COSTA, 1999)

Benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos (BTEX) e benzenos substitutos são os compostos orgânicos aromáticos voláteis mais comuns no petróleo. Estes são as frações mais móveis e solúveis dos produtos petrolíferos, e assim, frequentemente contaminam o solo, sedimentos e águas superficiais devido a determinados acidentes. BTEX são compostos carcinogênicos e neurotóxicos, sendo os principais poluentes resultantes de derramamentos de produtos petrolíferos (JOKUTY et al., 1999).

O teor de metais pode fornecer informações importantes acerca da origem dos óleos. Os principais elementos metálicos encontrados são níquel, vanádio, ferro e cobre. O níquel e vanádio têm efeitos prejudiciais nos catalisadores usados nos processos de craqueamento e dessulfurização (SPEIGHT, 1997).

2.4.2 Propriedades Físico-Químicas do Petróleo

2.4.2.1 Densidade

A densidade é definida como a massa por unidade de volume de uma substância. É frequentemente apresentada para os óleos em g/ml ou g/cm^3 , ou ainda em kg/m^3 . O óleo flutuará na água caso a sua densidade seja inferior à densidade da água. Alguns crus e óleos combustíveis residuais podem apresentar densidades superiores a $1,0 \text{ mg/l}$, e o seu comportamento dependerá da salinidade e temperatura da água.

Além da densidade do óleo depender da temperatura do mesmo, ela também aumenta após o derrame, devido à evaporação das frações voláteis (menos densas). Após evaporação considerável, a densidade de alguns óleos pode mesmo aumentar o suficiente para que estes se afundem na coluna de água.

A gravidade específica e a gravidade API (American Petroleum Institute) são propriedades relacionadas com a densidade e que são freqüentemente utilizadas. A gravidade específica (ou densidade específica) é a razão entre a densidade do óleo e a densidade da água pura, a uma dada temperatura. A gravidade API é mais freqüentemente utilizada na indústria petrolífera do que a densidade, e refere-se a uma temperatura de 15° C, sendo calculada da seguinte forma

$$\text{GravidadeAPI}(^{\circ}) = \frac{141,5}{\text{GravidadeEspecífica}(15^{\circ})} - 131,5 \quad (56)$$

Geralmente, os preços dos produtos petrolíferos são baseados na gravidade API, sendo que aqueles que apresentam valores API mais elevados (e portanto menores densidades) são, geralmente, mais caros. Os óleos podem também ser agrupado conforme a sua gravidade API:

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS ÓLEOS COM BASE NA GRAVIDADE API

Grupo	°API (60°F)
I	> 45.0
II	35.0 – 45.0
III	17.5 – 35.0
IV	17.5 – 10.0
V	<10.0

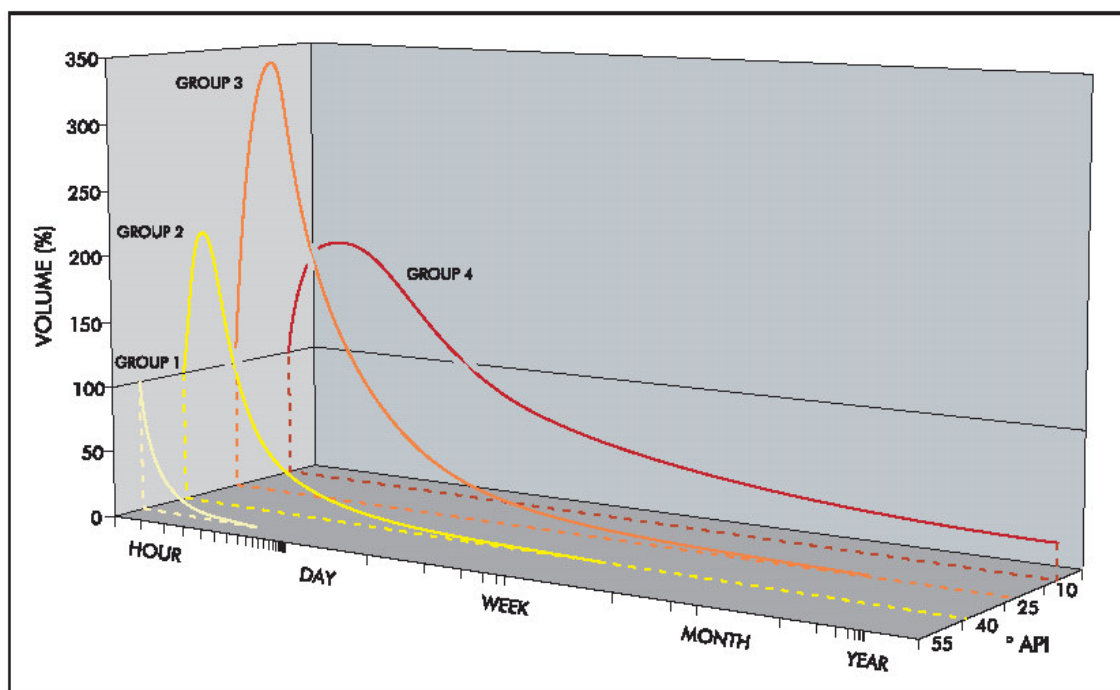
FONTE: NOAA, 2000.

Segundo a publicação técnica No 2 do International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF, 2002), os óleos com maior gravidade API tenderão a ser menos persistentes no meio. Para realizar cálculos empíricos aproximados de sua persistência classificam os óleos em quatro grupos de acordo a sua densidade específica. Ao grupo um, consistem os óleos com gravidade específica menor a 0,8 (API > 45); Ao grupo dois pertencem os óleos com gravidade específica entre 0,8 e

0,85 (API 35-45); Ao grupo três pertencem os óleos com gravidade específica entre 0,85-0,95 (API 17,5-35); No grupo quatro tem-se os óleos com gravidade específica maior a 0,95 (API < 17,5).

O Gráfico 2.1 mostra de forma simplificada a taxa de remoção natural dos quatro grupos de óleo tomando em conta o efeito da formação emulsão da água com óleo no tempo. O esquema foi desenvolvido com embasamento das observações feitas em campo procurando mostrar como a persistência do óleo varia de acordo às propriedades físicas do óleo, O comportamento preciso de um óleo vai depender das suas propriedades e condições ambientais em que ocorre o derramamento (ITOPF 2002).

GRÁFICO 2.1 - VOLUME DO ÓLEO E ÁGUA EM EMULSÃO DE ÓLEO, REMANECENTE NA SUPERFÍCIE DO MAR PARA OS QUATRO GRUPOS.



REFERENCIA: ITOPF 2002.

Segundo a publicação técnica No 1 do International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF, 2002), de acordo a coloração da mancha de óleo na superfície do

mar é possível associar uma espessura aproximada e portanto quantificar o volume derramado por determinada unidade de área, de acordo com a Tabela .

TABELA 2.2 - APARÊNCIA DO ÓLEO NO MAR

Aparência	Coloração	Espessura (mm)	Volume (m ³ /km ²)
Película	Prateada	0,0001	0,1
Filete	Iridescente	0,0003	0,3
Mancha densa	Negra/marrom escura	0,1	100
Emulsão/ “mousee”	Marrom/alaranjada	>1	> 1000

FONTE: ITOPI 2002.

2.4.2.2 Viscosidade

A viscosidade é a medida de resistência do fluido ao movimento; quanto menor a viscosidade, mais facilmente o produto flui. Tal como a densidade, a viscosidade é influenciada pela temperatura e pelo envelhecimento do óleo, diminuindo com o aumento da temperatura e aumentando com o envelhecimento do óleo.

Esta propriedade influencia o grau de espalhamento, a penetração no solo ou nos sedimentos e a seleção de equipamento mecânico para aspiração do produto.

2.4.2.3 Distribuição dos pontos de ebulição

Ponto de ebulição é a temperatura em que se dá a transformação da fase líquida para a fase de vapor. A distribuição dos pontos de ebulição de um produto é bastante utilizada na indústria de refinação do petróleo para avaliar novos produtos e a qualidade, quer na compra, quer durante o transporte, e ainda para fornecer informação quanto à maximização dos resultados no processo de refinação.

Para objetivos de análise dos óleos para fins ambientais, este tipo de

informação fornece uma indicação da volatilidade e distribuição dos componentes do produto, permitindo uma previsão da evolução do processo de evaporação. Geralmente, a distribuição dos pontos de ebulição é determinada por destilação.

2.4.2.4 Ponto de inflamação

O ponto de inflamação de um óleo é a temperatura a partir da qual se libertam vapores suscetíveis de se inflamarem, quando expostos a uma fonte de ignição. Este é um fator extremamente importante em relação à segurança das operações de limpeza do derrame.

Gasolinas e outros óleos combustíveis podem facilmente inflamar-se em muitas condições ambientais, e assim colocar um sério perigo quando derramados. Muitos óleos crus também têm pontos de inflamação baixos, até o momento em que os componentes mais voláteis se evaporam ou se dispersam.

2.4.2.5 Ponto de fluidez ou corrimento

O ponto de fluidez é a menor temperatura à qual o óleo flui, em condições de teste padrão. Acima dessa temperatura o óleo torna-se um semi-sólido ou plástico, geralmente devido à separação das ceras do óleo, ou no caso de produtos muito viscosos, devido ao efeito da viscosidade. Para óleos combustíveis residuais, os pontos de fluidez podem estar relacionados com o grau de aquecimento e arrefecimento a que os produtos foram sujeitos.

Do ponto de vista de resposta a um derrame, convém ressaltar que o ponto de fluidez depende de várias condições, portanto esta propriedade é uma indicação e não uma medida exata da temperatura à qual o produto deixa de fluir.

2.4.2.6 Solubilidade

Certos hidrocarbonetos dissolvem-se na água, tais como os aromáticos ligeiros e algumas parafinas. Estes possuem elevada solubilidade, pelo que após o derrame podem ser rapidamente dissolvidos, especialmente em condições de turbulência. Os compostos mais solúveis são também os que apresentam pontos de ebulição mais baixos, podendo também ser rapidamente evaporados. Na realidade, a solubilidade de um petróleo na água é muito baixa.

2.4.2.7 Formação de emulsões

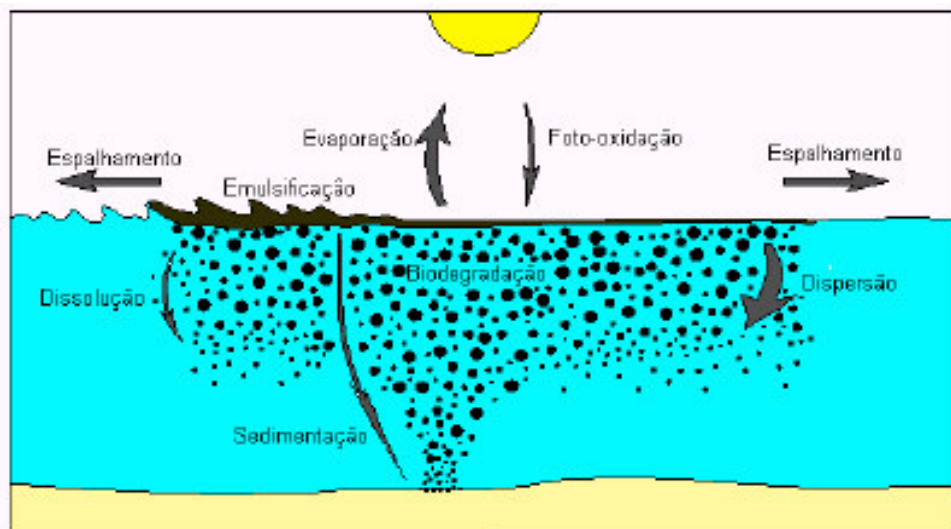
Uma emulsão água-óleo é uma dispersão estável de pequenas gotículas de água no óleo. Quando formadas estas emulsões podem apresentar características muito diferentes dos óleos antes da emulsificação. Este aspecto tem implicações importantes no comportamento do óleo derramado, e subseqüentes operações de limpeza, sendo assim importante conhecer se o óleo tende a formar emulsões estáveis, e qual o conteúdo máximo em água das mesmas.

2.5 ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES E PROCESSOS DE ENVELHECIMENTO DO PETRÓLEO

Cada produto petrolífero é composto por variados componentes com propriedades distintas, existindo centenas de óleos com composições diferentes. O comportamento desses mesmos óleos derramados na água é, portanto, muito diferente, e a obtenção de formulações capazes de reproduzir esses comportamentos para a variedade de óleos existentes é uma tarefa extremamente difícil. Além disso, muitos dos processos envolvidos no envelhecimento do petróleo são ainda pouco claros (como é o caso da emulsificação). Assim, é natural que muitas das formulações habitualmente utilizadas para modelar este tipo de acidentes sejam fundamentalmente empíricas, algumas delas sendo muito simplificadas. Os fenômenos que acontecem

quando o óleo é derramado num corpo d'água, ilustrado na Figura 2.4, são espalhamento, evaporação dispersão, sedimentação, emulsificação, dissolução, biodegradação e foto-oxidação os quais influenciam a viscosidade e a densidade do óleo.

FIGURA 2.4 - COMPORTAMENTO DO ÓLEO DERRAMADO EM UM CORPO DE ÁGUA



FONTE: ITOFF, 2002

2.5.1 Viscosidade

A viscosidade do óleo pode ser vista como é a medida de resistência do fluido ao movimento. Óleos muito viscosos têm tendência a movimentarem-se com maior dificuldade. Esta propriedade tem forte influência na aplicação de algumas técnicas de limpeza - dispersantes químicos e raspadores são ineficazes para produtos altamente viscosos - e é também um fator condicionante da dispersão; segundo DELVIGNE e SWEENEY (1988), a viscosidade do óleo define a dimensão das partículas formadas na dispersão. A viscosidade é fortemente influenciada pela temperatura, e aumenta à medida que o óleo envelhece, aumentando também a evaporação das frações leves e formação de emulsão com a água. Pode se apreciar a evolução da variação da viscosidade com o tempo no Gráfico 2.2.

A influência da temperatura pode ser determinada pela correlação de

Andrade:

$$\mu = \mu_0 e^{c_T \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.57)$$

em que μ é a viscosidade à temperatura T , μ_0 é a viscosidade inicial do óleo à temperatura de referência T_0 e c_T é uma constante empírica cujo valor recomendado pela NOAA (1994) é de 5000 K.

A modificação da viscosidade devido à emulsificação é geralmente definida pela equação de MOONEY (1951):

$$\mu = \mu_0 e^{\left[\frac{c_V F_{WV}}{(1 - c_M F_{WV})} \right]} \quad (2.58)$$

onde F_{WV} é a fração volumétrica de água na emulsão, c_M é uma constante empírica adimensional, onde MACKAY et al.(1980) recomenda o valor de 2,5 e c_V é a constante adicional de MOONEY (1951), cujo valor é de 0,65.

O efeito da evaporação na viscosidade é contabilizado da seguinte forma (MACKAY et al., 1980):

$$\mu = \mu_0 e^{(c_E F_{em})} \quad (2.59)$$

F_{em} é a fração em massa de óleo evaporado, e a constante empírica adimensional c_E depende do tipo de óleo, variando entre 1 e 10, assumindo valores mais elevados para produtos mais viscosos. Tendo em conta as três equações anteriores, é possível obter uma correlação final para a modificação do óleo:

$$\mu = \mu_0 e^{\left[(c_E F_{em}) + \frac{c_V F_{WV}}{(1 - c_M F_{WV})} + c_T \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]} \quad (2.60)$$

2.5.2 Densidade

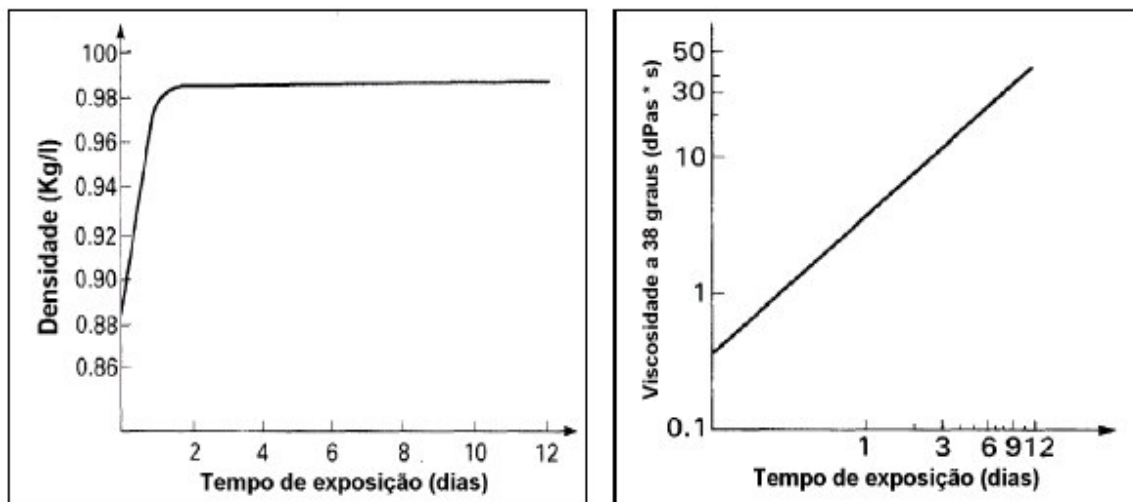
A maior parte dos óleos e produtos refinados é menos densa que a água, flutuando livremente na superfície após o derrame. A experiência indica também que as manchas de óleo que inicialmente flutuam, têm tendência a permanecer na superfície, excetuando casos em que há uma forte mistura do óleo com sedimentos, ou quando há combustão, originando a formação de resíduos altamente densos. Contudo, o óleo torna-se menos flutuante (a densidade aumenta) ao longo do tempo isto pode ser apreciado no Gráfico 2.2, à medida que as frações mais voláteis se evaporam, e há formação de emulsões água-óleo. A temperatura também influencia a densidade do óleo, e se este for derramado numa água que está a uma temperatura inferior a do óleo, a sua densidade vai aumentando à medida que a sua temperatura se vai reduzindo até à temperatura da água.

A influência destes fatores na densidade pode ser contabilizada através da seguinte equação:

$$\rho_e = F_{ww} \cdot \rho_w + \rho_{oil} (1 - F_{ww}) (1 + c_{DE} F_e) [1 - c_{DT} (T - T_0)] \quad (2.61)$$

em que ρ_e é a densidade da emulsão à temperatura T , ρ_{oil} é a densidade do óleo fresco à temperatura de referência T_0 , ρ_w é a densidade da água, c_{DE} e c_{DT} são constantes empíricas (NOAA, (1994) recomenda os seguintes valores: $c_{DE} = 0,18$ e $c_{DT} = 8 \times 10^{-4}$).

GRÁFICO 2.2 - (A) VARIAÇÃO DA DENSIDADE COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO (B) VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO



FONTE: DOERFFER, 1992

2.5.3 Espalhamento

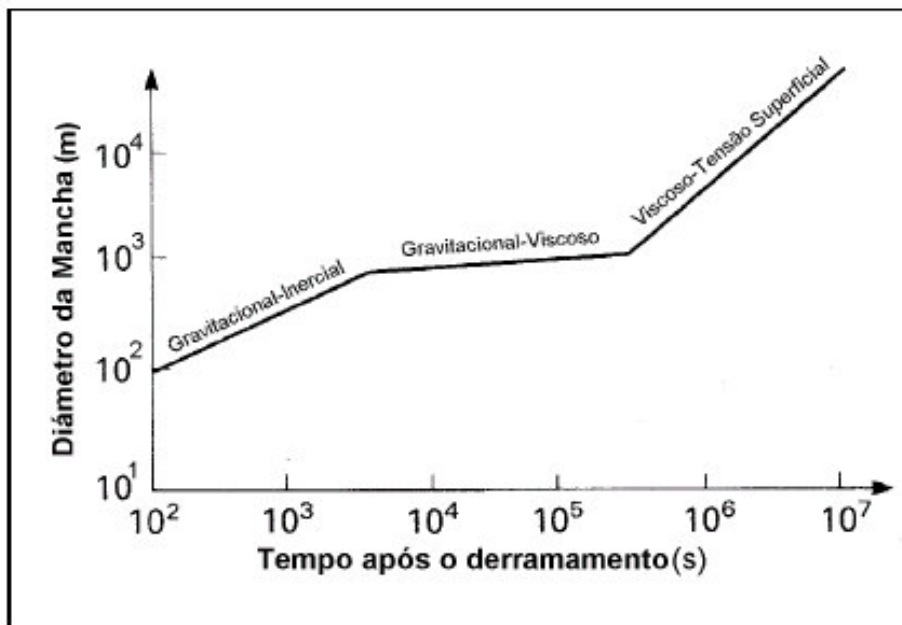
Pode-se definir o espalhamento natural do óleo como o aumento da área da mancha devido à tendência que o óleo tem para se espalhar em água parada. Esta tendência é explicada pelas forças da gravidade e da tensão superficial, e contrariada pelo efeito inercial e viscosidade interfacial (óleo-água). FAY (1969) analisou este balanço de forças, assumindo que a mancha é circular e que a espessura do óleo na mancha é homogênea.

Nos primeiros minutos após o derrame, o espalhamento é, provavelmente, o processo predominante. Após algum tempo, e mediante a existência de vento forte, turbulência e efeito das correntes, a mancha pode ser deformada, fragmentada e dispersa. Nestas condições, a aproximação de Fay torna-se inaplicável. Contudo, numa fase inicial do derrame, o cálculo da área da mancha pode ser estimado pela teoria de Fay ou outra teoria modificada, até porque a área é um parâmetro importante não só para o desenvolvimento de estratégias de defesa e contenção da mancha, mas também porque alguns processos de envelhecimento (como a evaporação, por exemplo) dependem diretamente da área superficial ocupada.

Assim, segundo FAY (1969), o espalhamento pode ser dividido em três fases como se pode apreciar na Figura 2.3, cada uma delas dominada por duas forças.

Imediatamente após o derrame, o espalhamento é comandado pelas forças de gravidade – trata-se da fase gravitacional-inércia. Após um período de tempo curto segue-se a fase gravitacional-viscosa, em que a força gravitacional é balanceada pela viscosidade interfacial óleo-água. Quando a espessura da mancha é muito pequena, a força gravitacional deixa de ser importante, sendo o espalhamento dominado pelas forças de tensão superficial, e contrariado pela viscosidade interfacial – esta é a fase tensão superficial-viscosa.

GRÁFICO 2.3 - AS TRÊS FASES DE ESPALHAMENTO DE UMA MANCHA DE PETRÓLEO EM AGUAS CALMAS



FONTE: DOERFFER, 1992

A equação de Fay que descreve o balanço das forças acima mencionado é a seguinte:

$$\alpha_1 (\rho_N - \rho_{oil}) gh^2 + \alpha_2 \sigma_n = \frac{\alpha_3 \rho_N v_w^{1/2}}{t^{1/2}} R \frac{dR}{dt} + \rho_N h \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (2.62)$$

onde:

R – raio da mancha assumindo um espalhamento assimétrico

ρ_w – densidade da água

ρ_o – densidade do óleo

σ – tensão interfacial óleo-água

g – aceleração da gravidade

t – tempo após o derrame

V_w – viscosidade cinemática da água

h – espessura da mancha

α_1 , α_2 e α_3 são constantes empíricas adimensionais, que podem ser estimadas como sendo $\alpha_1 = 0,42$, $\alpha_2 = 1,64$, $\alpha_3 = 0,86$, segundo STOLZENBACH (1977).

As soluções dessa mesma equação para as três fases assumem as seguintes formas, com todas as unidades no Sistema Internacional:

TABELA 2.3 - FÓRMULAS E COEFICIENTES DE FAY PARA OS DIFERENTES REGIMES DE ESPALHAMENTO

Fase de espalhamento	L	R	D
Gravitacional-inercial	$1.39(\Delta g A t^2)^{1/3}$	$k_1(\Delta g V t^2)^{1/4}$	$\frac{\pi k_1^2}{8}(\Delta g V t)^{1/2}$
Gravitacional-viscosa	$1.39\left(\frac{\Delta g A t^2}{v_w^{1/2}}\right)^{1/4}$	$k_2\left(\frac{\Delta g V^2 t^{3/2}}{v_w^{1/2}}\right)^{1/6}$	$\frac{\pi k_2^2}{16}\left(\frac{\Delta g V^2}{v_w^{1/2}}\right)^{1/3} \frac{1}{\sqrt{t}}$
Tensão Superficial-viscosa	$1.43\left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_w^2 v_w}\right)^{1/4}$	$k_3\left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_w^2 v_w}\right)^{1/4}$	$\frac{3\pi k_3^2}{16}\left(\frac{\sigma}{\rho_w v_w^{1/2}}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{t}}$

FONTE: FAY 1969. The spread of oil slicks on a calm sea. **Oil on the Sea**, Plenum Press, NY, p. 53-63

L – comprimento característico da mancha para um espalhamento unidimensional

D – o coeficiente de difusão, muitas vezes utilizado para cálculo do espalhamento com base em modelos trajetórias de partículas lagrangeanas.

$$\Delta = (\rho_w - \rho_o) / \rho_w$$

V – volume do óleo derramado

$A = 0.5V$ / unidade de comprimento da mancha

k_1 , k_2 e k_3 assumem diferentes valores por diferentes autores. Os valores recomendados por FLORES *et al.*(1999) são, respectivamente, 0,57, 0,725 e 0,5.

Uma vez que a fase inicial é muito curta, muitas vezes não chega sequer a ser modelada diretamente, sendo hábito calcular a área (A_0) e o tempo (t_0) em que esta fase termina, iniciando-se a fase gravitacional-viscosa:

$$t_0 = \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^4 \left(\frac{V_0}{\Delta g v_w} \right)^{1/3} \quad (2.63)$$

$$R_0 = \frac{k_2^2}{k_1} \left(\frac{\Delta g V_0^5}{v_w} \right)^{1/12} \quad (2.64)$$

A área no final da primeira fase é, assim, muitas vezes assumida como a área inicial da mancha.

Além disso, a terceira fase é também freqüentemente inaplicável, uma vez que esta fase só se inicia quando a mancha já é muito fina, resultando muitas vezes numa divisão em pequenas manchas devido aos efeitos do vento. Desta forma, os pressupostos de FAY (1969) não são satisfeitos, visto que a mancha deixa de ser única.

Portanto, é comum utilizar apenas a fase gravitacional-viscosa para calcular o espalhamento, assumindo que quando a espessura da mancha decresce até um determinado valor, o espalhamento termina. MACKAY *et al.*(1980) recomendou um valor de 0,1 mm, valor este que foi utilizado no modelo ADIOS (NOAA, 1994). No modelo de REED (1989) esse mesmo valor é utilizado para crus pesados, enquanto que para as substâncias menos viscosas assume-se o valor de 0,01 mm.

Uma vez que as fórmulas de Fay subestimam a taxa de espalhamento para a fase gravitacional-viscosa (pois não consideram o efeito do vento e a turbulência associada), surgiram algumas correções empíricas. LEHT *et al.*(1989) propôs a

seguinte formulação modificada de Fay:

$$A_s = 2270(\Delta V)^{2/3} t^{1/2} + 40(\Delta V)^{1/3} W^{4/3} t \quad (2.65)$$

em que W é a velocidade do vento em nós, V é o volume em barris, t é o tempo em minutos e A_s é a área da mancha em m^2 .

Outra formulação modificada de Fay para o espalhamento na fase gravitacional-viscosa foi proposta por MACKAY et al.(1980) e utilizada em diversos modelos:

$$\frac{dA_s}{dt} = K_M A_s^{-1} V^{4/3} \quad (2.66)$$

sendo K_M uma constante empírica com um valor de 150 s^{-2} .

2.5.4 Evaporação

Este é um processo bastante importante, que ocorre desde o início do derrame. Quando o óleo é derramado, os componentes que possuem ponto de ebulição mais baixo (mais voláteis) são rapidamente volatilizados, reduzindo assim o volume e a massa da mancha que permanece na água. Durante as primeiras 24 horas após o derrame, a maior parte dos óleos-crus perde aproximadamente 25-30% dos seus componentes mais leves. Os derrames de hidrocarbonetos mais leves podem ter os seus volumes reduzidos em 40% em poucas horas, apenas devido à evaporação (COSTA, 1999). A evaporação destes componentes mais voláteis aumenta a densidade e viscosidade da mancha de óleo, podendo os compostos mais pesados continuar a sofrer outros processos de envelhecimento. A evaporação é, portanto, o primeiro processo envolvido na remoção de óleo da superfície da água. À medida que o óleo continua a envelhecer, e especialmente se formarem emulsões água-óleo, a evaporação vai diminuindo progressivamente.

A taxa e extensão da evaporação dependem de diversos fatores, tais como as frações com baixo ponto de ebulição, área superficial e espessura da mancha, pressões de vapor do óleo e coeficiente de transferência de massa, que por seu turno são funções da composição do óleo, velocidade do vento, estado do mar e temperatura do ar e da água.

Diferentes algoritmos podem ser utilizados para o cálculo da taxa de evaporação. Entre os mais conhecidos encontram-se o modelo de pseudocomponentes (YANG & WANG, 1977 e PAYNE et al., 1984) e o modelo analítico, também conhecido como o modelo de exposição evaporativa (STIVER e MACKAY, 1984).

A aproximação de pseudocomponentes assume que os óleos-crus e os produtos refinados são constituídos por uma mistura de componentes discretos independentes, designados por pseudocomponentes, em que cada um deles é tratado como sendo uma substância singular com uma pressão de vapor associada. Os pseudocomponentes e o respectivo ponto de ebulição são geralmente determinados com base no método da destilação.

A taxa de evaporação volumétrica para cada pseudocomponente i pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\frac{dV_e^i}{dt} = K_e^i \frac{P_i^{sat} \bar{V}_i}{RT} A_s X_i \quad (2.67)$$

Em que V_e^i o volume evaporado da fração i , t é o tempo, K_e^i é o coeficiente de transferência de massa, P_i^{sat} é a pressão de vapor da fração considerada, R é a constante universal dos gases perfeitos, T é a temperatura do óleo, \bar{V}_i é o volume molar relativo da fração i , A_s é a área da mancha e X_i é a fração molar do componente i . Por vezes, é utilizada alternativamente a fração em volume.

O volume molar relativo de cada pseudocomponente é encontrado a partir de uma correlação entre o volume molar e o ponto de ebulição para uma série de alcanos (C_3 - C_{20}):

$$\bar{V}_i = 7 \cdot 10^{-5} - (2.102 \cdot 10^{-7} \cdot BP_i) + (1 \cdot 10^{-9} \cdot (BP_i)^2) \quad (2.68)$$

A pressão de vapor saturado de cada pseudocomponente pode ser determinada com base na equação de Antoine:

$$\ln \frac{P_i^{sat}}{P^0} = \frac{\Delta S_i (BP_i - C_{2,i})}{\Delta Z \cdot R \cdot BP_i} \cdot \left[\frac{1}{BP_i - C_{2,i}} - \frac{1}{T - C_{2,i}} \right] \quad (2.68)$$

em que P_0 é a pressão atmosférica, ΔS_i é a variação na entropia resultante da vaporização da fração i , ΔZ é o fator de compressibilidade (assume-se que $\Delta Z = 0,97$), BP_i é o ponto de ebulição do componente i , e $C_{2,i}$ é um coeficiente empírico.

Assim,

$$\Delta S_i = 8.75 + 1.987 \log(BP_i) \quad (2.70)$$

$$C_{2,i} = 0.19 \cdot BP_i - 18 \quad (2.71)$$

O coeficiente de transferência de massa pode assumir diferentes formulações. Segundo MACKAY e MATSUGU (1973):

$$K_e^i = 0.029 W^{0.78} D_s^{-0.11} Sc_i^{-0.67} \sqrt{\frac{M_i + 29}{M_i}} \quad (2.72)$$

em que nesta equação W é a velocidade do vento em $m \cdot h^{-1}$, D_s é o diâmetro da mancha(m), Sc_i é o número de Schmidt para a fração i (adimensional) e M_i é a massa molar de cada fração ($Kg \cdot mol^{-1}$). As unidades de K_e^i são, portanto, em $m \cdot h^{-1}$. Mais tarde BUCHANAN e HURFORD (1988) propuseram uma formulação mais simples:

$$K_e = 2.5 \cdot 10^{-3} W^{0.78} \quad (2.73)$$

O valor de $2.5 \cdot 10^{-3}$ não é consensual em toda a literatura, podendo variar entre $1,5 \cdot 10^{-3}$ e $5,0 \cdot 10^{-3}$.

No modelo ADIOS2 (NOAA, 2000), o coeficiente de transferência da massa é determinado com base na formulação de Mackay e Matsugu, mas utilizando um único valor para o número de Schmidt baseado na massa molar média do óleo, e a velocidade do vento em m.s^{-1} :

$$K_e = 2.5 \cdot 10^{-3} W^{0.78} \cdot \left(\sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \right)^{-0.11} \cdot \left[1.3676 \left(\sqrt{\frac{0.018}{M_i}} \right)^{0.67} \right] \quad (2.74)$$

O método da exposição evaporativa pode ser expresso por:

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K_e A_s}{V_0} \cdot \exp \left(A - \frac{B}{T} (T_0 + T_G F_e) \right) \quad (2.75)$$

F_e é a fração volumétrica de óleo evaporado A e B são constantes empíricas, T_0 é o ponto de ebulição inicial e T_G é o gradiente da curva de destilação. Todas estas propriedades dependem do tipo de óleo. Caso estes valores sejam desconhecidos, poderão ser aproximados, sendo T_0 e T_G estimados com base na densidade API , de acordo com a versão 1.1 do modelo ADIOS (NOAA, 1994):

$$A = 6,3 \quad B = 10,3$$

Para óleos-crus:

$$T_0 = 532.98 - 3.1298 \cdot API \quad (2.76)$$

Para produtos refinados:

$$T_0 = 654.45 - 4.6588 \cdot API \quad (2.77)$$

T_G , na versão 2 do ADIOS (NOAA, 2000) é determinado da seguinte forma:

$$T_G = 1356.7 - 247.36 \cdot \ln(API) \quad (2.78)$$

O método dos pseudocomponentes fornece resultados bastante razoáveis, no entanto requer maior informação sobre o óleo. Para além disso, o fato das frações serem determinadas com base na temperatura de destilação poderá conduzir a alguns desvios à realidade, uma vez que compostos diferentes podem possuir a mesma temperatura de ebulição, como por exemplo alcanos, naftenos e aromáticos.

Quanto ao método da exposição evaporativa, este não requer informação sobre a composição do óleo. Contudo, os resultados obtidos podem ser bastante falíveis para óleos com curvas de destilação não-lineares, como os produtos refinados.

2.5.5 Dispersão

A dispersão vertical é um processo físico em que as gotículas de óleo são transportadas a partir da superfície do mar para a coluna de água, sobretudo devido à rebentação das ondas. Essas gotículas podem ter dimensões variáveis, sendo que as mais pequenas não voltam à superfície devido à turbulência natural da água, difundindo-se na coluna de água.

Este processo segundo REED (1999) é influenciado por três fatores essenciais: viscosidade do óleo, temperaturas da água e do ar e estado do mar.

Quanto maior for a viscosidade do produto, maior é a possibilidade de se formarem espessas camadas de óleo na superfície da água, e assim diminuir a dispersão do mesmo na água, ao contrário dos hidrocarbonetos menos viscosos que facilmente se podem dispersar completamente ao fim de alguns dias.

As temperaturas da água e do ar também podem inibir a dispersão, caso sejam inferiores ao ponto de fluidez.

O estado do mar é associado à energia da rebentação das ondas. Assim, em derrames de óleo durante tempestades, a dispersão poderá ser o principal mecanismo de remoção de óleo da superfície, enquanto que em condições meteorológicas normais a evaporação será mais significativa, apesar da dispersão poder continuar a ter alguma relevância.

Estudos mais recentes demonstraram que a presença de quantidades significativas de asfaltenos retarda o processo de dispersão do óleo (FINGAS et al., 1993).

DELVIGNE & SWEENEY (1988) desenvolveram uma série de estudos laboratoriais acerca da dispersão natural do óleo. Com base nos resultados experimentais obtidos, desenvolveram uma relação empírica para a taxa de dispersão do óleo para a coluna de água devida à rebentação das ondas:

$$\frac{dm_d}{dt} = c_{oil} \cdot D_{ba}^{0.57} \cdot f_s \cdot F_{wc} \cdot d_0^{0.7} \cdot \Delta d \quad (2.79)$$

em que f_s é a fração de superfície coberta por crus (igual ao conteúdo de óleo na emulsão óleo+água); d_0 é o diâmetro das partículas; Δd é o intervalo de diâmetros das partículas; c_{oil} é um parâmetro determinado experimentalmente, e que depende do tipo de óleo e D_{ba} é a energia de dissipação das ondas por unidade de área superficial, que pode ser calculada da seguinte forma:

$$D_{ba} = 0.0034 \rho_w g H_{rms}^2 \quad (2.80)$$

H_{rms} , é determinada por:

$$H_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} H_0 \quad (2.81)$$

sendo H_0 a altura da onda.

F_{wc} é a fração de superfície de mar atingida pela rebentação das ondas por unidade de tempo, dada por:

$$F_{wc} = \frac{C_b (W - W_i)}{T_w} \quad (2.82)$$

onde $C_b = 0,032 \text{ s.m}^{-1}$ e W_i é a velocidade do vento para iniciar o rompimento (5 m.s^{-1}). T_w é o período da onda.

Caso a altura e período de onda não sejam conhecidos, estes poderão ser determinados empiricamente, com base na velocidade do vento, de acordo com a formulação utilizada no modelo ADIOS (NOAA, 1994):

$$H_0 = 0,243 \frac{W^2}{g} \quad (2.83)$$

$$T_w = 8,13 \frac{W}{g} \quad (2.84)$$

Uma vez que a energia turbulenta é de difícil determinação, existem outros algoritmos simplificados que parametrizam o processo de dispersão em função do quadrado da velocidade do vento. Entre eles, encontra-se a formulação utilizada por MACKAY et al. (1980):

$$\frac{dm_d}{dt} = 0,11 m_{oil} \frac{(1 + W)}{1 + 50 \mu^{1/2} h \sigma} \quad (2.85)$$

Esta formulação determina a taxa de transferência de massa por hora, em que m_{oil} é a massa de óleo que permanece à superfície, μ é a viscosidade dinâmica do óleo (cP), h é a espessura da mancha (cm) e, W é a velocidade do vento (m.s^{-1}) e σ é a tensão interfacial óleo-água (dyne.cm^{-1}).

2.5.6 Sedimentação

Parte do petróleo acaba por se sedimentar freqüentemente associado à matéria em suspensão na coluna de água, originando um aumento da massa volumétrica e conseqüentemente o movimento descendente das partículas na coluna de

água até ao fundo do mar.

Outros fenômenos podem originar o aumento da massa volumétrica das manchas de petróleo e/ou das gotículas presentes na coluna de água e conseqüente sedimentação: processos de envelhecimento do petróleo (evaporação, dissolução e emulsificação) e incorporação nas fezes de organismos que ingerem o petróleo. Qualquer destes fenômenos é menos importante para a sedimentação, do que agregação das partículas de hidrocarbonetos à matéria em suspensão, embora certos crus mais densos que a água possam afundar-se por natureza e assim sedimentar.

Assim, as concentrações de partículas de óleo e de matéria em suspensão na água são decisivas para a ocorrência de sedimentação. Por conseguinte, a maior concentração de partículas em suspensão existente nas zonas costeiras torna o processo de sedimentação mais importante junto à costa, embora este processo seja em geral, pouco importante nos primeiros dias.

O processo de sedimentação de petróleo é relativamente complicado, e de difícil contabilização.

A próxima formulação foi proposta pela Science Applications International (PAYNE et al., 1987) e é utilizada no modelo ADIOS2 (NOAA, 2000):

$$\frac{dm_{sed}}{dt} = 1,3 \sqrt{\frac{E}{V_w}} K_a \cdot C_{oil} \cdot C_{sed} \cdot z_i \cdot A_s \quad (2.86)$$

Esta equação fornece a massa de óleo sedimentado por unidade de tempo ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), em que:

V_w é a viscosidade dinâmica da água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); K_a é o parâmetro de adesão, que toma o valor de $1 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; z_i é a profundidade de intrusão das partículas de óleo na coluna de água devido à rebentação das ondas, dada por DELVIGNE & SWEENEY (1988), dada por:

$$z_i = 1,5 \cdot H_0 \quad (2.87)$$

E é a taxa de energia dissipada da superfície da água ($\text{J.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$). Pode ser estimada a partir da energia de dissipação das ondas (D_{ba}) explicada na seção da dispersão, através de:

$$E = \frac{D_{ba}}{z_i T_w} \quad (2.88)$$

C_{sed} é a concentração de sedimentos na coluna de água (kg.m^{-3}), enquanto que C_{oil} é a concentração de partículas de óleo na coluna de água (kg.m^{-3}). Apenas as gotículas com mais de 70 μm são consideradas, uma vez que as restantes não flutuarão, sendo assim removidas da mancha, quer adiram ou não aos sedimentos. Esta concentração pode ser determinada através da taxa de dispersão proposta por DELVIGNE & SWEENEY (1988) (explicada na secção da dispersão) para partículas com diâmetro superior a 70 μm , e integrando essa taxa para o período de onda e a profundidade de intrusão das partículas de óleo:

$$C_{oil} = \frac{\frac{dm_d}{dt}}{z_i \cdot T_w} \quad (2.89)$$

2.4.7 Emulsificação

De acordo com FINGAS et al. (1997, 1999) a formação de emulsões não é mais do que a dispersão de pequenas gotículas de um líquido dentro de outro. Pode-se, assim, estar na presença de dois tipos de emulsões: óleo-água – que acaba por ser o processo de dispersão já referido – e água-óleo, também designada por formação de *mousse*, em que as gotas de óleo estão dispersas na água, formando uma emulsão estável e persistente. Uma emulsão estável e totalmente emulsificada pode conter 80 a

90% de água.

O processo de formação de *mousse* parece estar bem documentado, contudo a informação relativamente à cinética do processo no mar e à modelação é escassa, embora este seja um mecanismo importante para o envelhecimento do petróleo.

A tendência de formação e estabilidade das emulsões água-óleo parece ser função do conteúdo em asfaltenos e parafinas do petróleo. Daí que a maior parte dos produtos refinados não forma emulsões água-óleo estáveis devido à ausência de parafinas e asfaltenos. A mínima percentagem de massa, de asfaltenos e de parafinas, para estabilizar uma emulsão é de cerca de 3% (FINGAS et al, 1996). Estes compostos estão estabilizados em muitos óleos-crus pelos solventes aromáticos. Assim, à medida que processos como a evaporação e foto-oxidação eliminam os solventes aromáticos, o conteúdo de asfaltenos e parafinas no petróleo altera-se e estes compostos começam a precipitar, reduzindo a tensão superficial da interface óleo-água e originando o processo de emulsificação, sendo que as gotículas de água, após se dispersarem na fase do óleo, ficam estabilizadas pelos asfaltenos e parafinas precipitados.

É, pois, comum que a maioria dos óleos-crus só inicie a emulsificação após uma certa fase de envelhecimento. A ocorrência deste processo, para além de depender da composição do petróleo, depende também do estado do mar, sendo que a formação de emulsões é favorecida na presença de mar agitado.

A emulsificação é considerada muitas vezes como o 2º processo mais importante, logo após a evaporação, devido ao efeito significativo que o mesmo tem no comportamento das manchas de petróleo no mar. A formação de emulsões ou *mousse* normalmente provoca um aumento da viscosidade de cerca de 1000 vezes, e diminui o espalhamento e a evaporação, e devido à sua estabilidade e persistência, retardam a sua eliminação, inibindo algumas reações químicas e biológicas, uma vez que reduzem as áreas expostas ao ar e à água.

Ao nível das operações de remoção e limpeza, o processo também é dificultado, quer ao nível do maior volume de produto a ser removido, quer ao nível da menor eficiência com que os equipamentos recolhem o petróleo nas circunstâncias

consideradas.

Após o início da emulsificação, a incorporação de água no óleo pode ser descrita por uma equação proposta por MACKAY et al. (1980), e largamente utilizada em modelos de envelhecimento de petróleo:

$$\frac{dF_{wv}}{dt} = K_w (1 + W)^2 \left(1 - \frac{F_{wv}}{F_{wv}^{final}} \right) \quad (2.90)$$

,em que F_{wv} é a fração volumétrica de água incorporada na emulsão; F_{wv}^{final} é a fração volumétrica final de água incorporada na emulsão.

K_w - constante empírica, que no modelo ADIOS (NOAA, 1994) assume o valor de $1.6 \cdot 10^{-6}$

Outra formulação menos conhecida, mas que tem em conta algumas propriedades do óleo, é a equação de RASMUSSEN (1985)

$$\frac{dF_{wv}}{dt} = R_1 - R_2 \quad (2.91)$$

sendo:

R_1 – taxa de entrada de água (s^{-1}), dada por:

$$R_1 = \frac{K_1}{\mu_0} (1 + W) (F_{wv}^{final} - F_{wv}) \quad (2.92)$$

R_2 – taxa de saída de água (s^{-1}), dada por:

$$R_2 = \frac{K_2}{Asph \cdot Wax \cdot \mu_0} F_{wv} \quad (2.93)$$

Asph é o conteúdo de asfaltenos no óleo (%), *Wax* é o conteúdo de parafinas (%), e K_1 e K_2 são constantes determinadas experimentalmente por RASMUSSEN (1985) : $K_1 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ kg.m}^{-3}$ $K_2 = 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$.

2.5.8 Dissolução

A dissolução é o processo através do qual os hidrocarbonetos solúveis se fragmentam em partículas pequeníssimas, misturando-se com a água e originando uma massa líquida homogênea entre ambos. A reduzida presença de hidrocarbonetos solúveis no petróleo resulta numa baixa perda de hidrocarbonetos por dissolução, quando comparado com outros processos.

A dissolução ocorre nos hidrocarbonetos de menor peso molecular, sendo estes também mais solúveis e mais voláteis, e tanto pode ter origem diretamente na mancha superficial como nas gotículas de petróleo presentes na coluna de água. A dissolução e a evaporação são dois processos competitivos. Para manchas superficiais, uma vez que as pressões parciais tendem a exceder as solubilidades dos compostos de menor peso molecular, verifica-se uma predominância de massa evaporada relativamente à dissolução (REED, 1999).

Embora após o derrame da mancha, inicialmente a dissolução aumente, após alguns minutos verifica-se um rápido decréscimo, devido às perdas por evaporação. Dados experimentais demonstram que após cerca de 15 minutos de Modelação de contacto com a água o processo de solubilização parece estar concluído. A solubilidade pode variar entre 1 e 100 ppm (FINGAS et al., 1996).

A dissolução é particularmente importante em superfícies cobertas de gelo ou em gotas de petróleo dispersas na coluna de água, ou seja, onde a evaporação é reduzida. Para as condições referidas, a menor exposição atmosférica e em particular para as gotas dispersas a maior área superficial por unidade de volume justificam o acréscimo de importância da dissolução relativamente à evaporação. A dissolução varia, portanto, com diversos fatores, entre os quais, a facilidade de dispersão e

espalhamento dos hidrocarbonetos, a sua composição, temperatura da água e agitação marítima.

Este processo pode ser quantificado através do método de COHEN et al. (1980). Neste método, a taxa de dissolução (g.h^{-1}) é calculada através de:

$$\frac{d\text{Diss}}{dt} = K \cdot f_s \cdot A_s \cdot S \quad (2.94)$$

,em que f_s é a fração de superfície coberta por crus (igual ao conteúdo de óleo na emulsão óleo+água); A_s é a área da mancha de óleo (m^2) e S é a solubilidade do óleo na água. HUANG & MONASTERO (1982) propuseram que para um óleo típico, a solubilidade pode ser calculada através de:

$$S = S_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (2.95)$$

,em que S_0 é a solubilidade do óleo “fresco” (30 g.m^{-3}); α é a constante de decaimento ($0,1$); t é o tempo após o derrame (h) e K é o coeficiente de transferência de massa por dissolução ($0,01 \text{ m.h}^{-1}$).

2.5.9 Degradação

A degradação do petróleo pode ocorrer como resultado da luz solar (oxidação fotoquímica) ou através de ação biológica (biodegradação) (ITOPF, 2002).

2.5.9.1 Oxidação fotoquímica

A oxidação fotoquímica do petróleo é o processo químico através do qual se dá a degradação do mesmo devido à ação da radiação ultravioleta do sol (fotólise), em que há uma transformação de alguns componentes químicos do petróleo em componentes polares através da adição de oxigênio, aumentando a hidrossolubilidade

dos hidrocarbonetos, sendo mais facilmente degradados. Esta reação ocorre na superfície da mancha de petróleo, sendo por isso acelerada por um maior espalhamento. Contudo, a oxidação fotoquímica é um processo lento, já que a penetração de oxigênio é muito reduzida.

Outros fatores podem condicionar a taxa de oxidação do petróleo, tais como a espessura da mancha, a presença de sais minerais dissolvidos na água, composição do petróleo, incluindo presença de metais, e quantidade de radiação com comprimento de onda inferior a 400 nm, latitude do derrame. Em algumas áreas com maior incidência de radiação (como o Ártico no Verão) o processo de foto-oxidação poderá ser significativo. Porém, nos primeiros dias o processo é pouco importante, tornando-se significativo a partir da primeira semana.

A oxidação fotoquímica, ao transformar alguns componentes químicos do petróleo em componentes polares, aumenta a fração de resinas e asfaltenos (estes em menor escala) no petróleo. Assim, é provável que seja potenciada a formação de emulsões (que é influenciada pelo conteúdo em resinas e asfaltenos no petróleo). Contudo, esta é uma matéria ainda pouco estudada, pelo que a previsão do grau de foto-oxidação e a quantificação da sua influência sobre a formação de emulsões são áreas ainda relativamente desconhecidas.

2.5.9.2 Biodegradação

A biodegradação ocorre quando microorganismos são responsáveis pela transformação de hidrocarbonetos em compostos mais simples, é a chamada oxidação bioquímica. Existem várias algas, bactérias e fungos responsáveis por este processo, existindo em maior quantidade em águas contaminadas com descargas de esgotos não tratados, por exemplo.

Este processo será mais significativo, quanto maior for a extensão da superfície do derrame em contacto com a água e as bactérias, maior temperatura, maior disponibilidade de nutrientes (fósforo e nitrogênio) e oxigênio. A composição

dos hidrocarbonetos também é importante, uma vez que a biodegradação é mais relevante nas frações leves. Assim, o espalhamento, a dispersão e a dissolução facilitam a ocorrência da biodegradação.

Porém a redução de hidrocarbonetos por este processo bioquímico é insignificante quando comparada com as perdas por evaporação ou dispersão, por exemplo, sobretudo nos primeiros dias após o derrame, uma vez que a biodegradação é um processo muito lento e em pequena escala.

2.6 LEGISLAÇÃO

2.6.1 Legislação Internacional

As discussões internacionais para nortear as medidas preventivas e corretivas sobre a poluição por óleo no mar não são muito antigas. A OILPOL 54 é primeira convenção internacional reconhecida, realizada pelo governo britânico em 1954, por iniciativa do Conselho Econômico e Social das Nações Unidas, visando prevenir a contaminação por óleo transportado pelos navios. A segunda convenção mais importante a seguir foi a SOLAS 1960 - International Convention for the Safety of Life at Sea, discutida anteriormente em 1914 e 1948, mas que passou a vigorar apenas em 1965, abordando entre outros temas importantes, a segurança da navegação, o transporte de cargas a granel, o transporte de substâncias perigosas e os navios nucleares.

Da IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization), surgiu a Organização Marítima Internacional (OMI) ou IMO - International Maritime Organization, acumulando mais de cinquenta anos de experiência no assunto, promovendo 47 convenções internacionais, protocolos e emendas sobre Segurança da Vida Humana no Mar Proteção do Meio Marinho, Transporte de Carga, Facilitação do Transporte Marítimo entre as quais se destacam a CLC 69, MARPOL 73/78 e a OPRC 90.

CLC 69 A Civil Liability Convention (CLC) ou Convenção sobre a Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo, realizada em Bruxelas em 1969. Tem como objetivo principal estabelecer o limite de responsabilidade civil por danos a terceiros causados por derramamentos de óleo no mar, excluindo-se os derivados claros como gasolina, óleo diesel e querosene, criando assim um sistema de seguro compulsório, que se aplica aos navios petroleiros dos países signatários a esta Convenção. Esta Convenção está ratificada por 79 países entre eles o Brasil, excluindo-se os Estados Unidos.

FUNDO 1971 (IOPC Fund), OU CONVENÇÃO DE BRUXELAS 1971, O Comitê de Aspectos Legais da IMO estabeleceu nesta Convenção a criação do Fundo Internacional de Compensação por Danos pela Poluição por Óleo (IOPC Fund), que entrou em vigor em 1978. O propósito deste fundo é prover indenizações cujos valores excedam o limite de responsabilidade do armador, estabelecido pela CLC 69. Os recursos são provenientes de uma taxa sobre a quantidade de petróleo importado por ano, via marítima e, conta com o patrocínio de empresas e pessoas jurídicas que utilizam óleo cru e outros óleos pesados. As indenizações têm como teto o valor de US\$ 81,8 milhões. Esta Convenção foi ratificada por 56 países, os quais também são signatários da CLC 69. Embora o governo brasileiro tenha assinado a CLC 69, ainda não ratificou a sua participação neste Fundo.

MARPOL73/78 Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios, alterada posteriormente pelo Protocolo de 1978 e por uma série de emendas a partir de 1984, visando introduzir regras específicas para estender a prevenção da poluição do mar às cargas perigosas ou equivalentes às dos hidrocarbonetos. As regras da MARPOL passam por um processo dinâmico de aperfeiçoamento em função das inovações tecnológicas, científicas e políticas. O governo brasileiro aprovou com restrições os textos desta Convenção pelo Decreto Legislativo No 2508/98 de 04/03/1998.

Navios de Casco Duplo assunto de grande interesse relativo à MARPOL é a regulamentação sobre navios de casco duplo. A IMO - Organização Marítima

Internacional, durante a 46ª MEPC - Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho, realizada em abril 2001, determinou que os navios entregues a partir de 06/07/1996, deveriam ser do tipo casco duplo - regra 13 G do Anexo I. De acordo com as novas regras, o limite de vida útil dos petroleiros foi reduzido de 30 para 25 anos (graças a atuação do representante brasileiro), devendo ser intensificadas as vistorias nas embarcações, visando preservar navios com boas condições de manutenção.

CONVENÇÃO DE PARIS DE 1974 Fontes terrestres Convenção para Prevenção da Poluição Marítima por Fontes Situadas em Terra. Começou a vigorar em maio de 1978 sendo o principal instrumento internacional a respeito da prevenção da poluição por portos e terminais entre outras fontes terrestres.

SALVAGE 89 Convenção Internacional sobre Salvamento. Foi adotada em 28/04/1989 e passou a vigorar em 14/07/1996. Visa incentivar, mesmo monetariamente, operações de salvamento de navios ou outros tipos de embarcação e prevenir a poluição marinha por tais operações.

OPRC 90 A Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em Casos de Poluição por Óleo (Oil Pollution Preparedness, Response and Co-Operation) foi estabelecida pela IMO em 30/11/1990, em função do acidente ocorrido com o petroleiro Exxon Valdez no Alasca, em 1989 e do inacreditável derramamento de óleo provocado por forças militares durante a Guerra do Golfo Pérsico. Passou a vigorar em 1995. Visa facilitar a cooperação internacional e a assistência mútua no preparo para o atendimento aos casos de vazamentos de óleo e incentivar os países a desenvolver e manter adequada capacitação para lidar, de maneira eficaz, com as emergências decorrentes deste tipo de poluição. Estende seu alcance às instalações portuárias que operam com hidrocarbonetos e derivados além dos navios e plataformas. Entre os aspectos estabelecidos destaca-se que:

- os estados devem exigir planos de emergência individuais das instalações que manuseiam hidrocarbonetos e derivados ,

- cada país deverá estabelecer um sistema nacional de resposta aos acidentes (plano nacional de contingência) a partir dos planos de emergência individuais e um

sistema internacional, contemplando a cooperação de dois ou três países, se necessário;

- os navios devem ser providos de manual de instruções para os procedimentos de emergência (não se aplica aos navios de guerra, de auxílio naval ou operado por um governo com fins que não sejam comerciais);

- a notificação dos acidentes deve ser feita rapidamente aos países envolvidos;

- os países poderão solicitar a cooperação internacional quando os acidentes ocorrerem, devendo também promover a cooperação nas áreas de pesquisas relacionadas com a prevenção da poluição por óleo;

- a IMO deverá prover informação, educação, treinamento e serviços de consultoria internacional durante os acidentes.

No Brasil, esta convenção foi promulgada pelo Decreto Legislativo No 43 de 01/06/1998.

2.6.2 Legislação Nacional

A legislação nacional sobre poluição por óleo no mar por navios data do século XIX; é o Decreto Federal No 3.334 de 05/07/1899 -Art. 176 que:

"Proíbe o lançamento ao mar ou rio, de bordo de navios ou de quaisquer embarcações, lixo, cinza, varreduras do porão, etc, para o que as capitânicas, de acordo com a repartição sanitária ou com a câmara municipal, designarão em ilhas situadas a sotavento dos ventos reinantes nos portos, local adequado para o vazadouro."

Em 1967 foi aprovada a Lei Federal 5.357 que vigorou por trinta e três anos até ser substituída pela Lei Federal 9.966/00. A Lei 5.357/67 estabelecia penalidades para embarcações e terminais marítimos ou fluviais de qualquer natureza, estrangeiros ou nacionais, que lançassem detritos ou óleo nas águas brasileiras.

A seguir serão apresentadas, resumidamente, uma abordagem geral sobre a legislação brasileira relacionada direta e indiretamente com a poluição marinha.

Decreto Federal No 79.437 de 28/03/1971 Promulga a Convenção Internacional sobre a Responsabilidade Civil de Danos Causados por Poluição por Óleo (CLC 69)

Decreto Federal No 83.540 de 04/06/1979 Regulamenta a aplicação da Convenção Internacional sobre a Responsabilidade Civil de Danos Causados por Poluição por Óleo (CLC 69) e dá outras providências.

Portaria do Ministério dos Transportes N.º 124, de 20/08/80 Prevenção da poluição origem terrestre, exige que as indústrias potencialmente poluidoras e as construções ou estruturas que armazenem substâncias também potencialmente poluidoras, se instalem a uma distância mínima de 200 metros dos corpos d' água. E ainda, que todo depósito construído acima do nível do solo, que receba líquidos potencialmente poluentes, seja protegido de forma a evitar que eventuais vazamentos atinjam os corpos d' água. Para tanto deverão ser construídos tanques, amuradas, silos subterrâneos ou outros dispositivos de contenção que se mostrem necessários.

Lei Federal No 7.203 de 03/07/1984 Assistência de Embarcações em Perigo no Mar, Dispõe sobre Assistência e Salvamento de Embarcações, Coisa ou Bem em Perigo no Mar.

Lei Federal No 7.661 de 16/05/1988 Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro o qual foi aprovado, posteriormente, pela Resolução No1, de 21/11/1990, do Ministério da Marinha. De acordo com este Plano, os estados da federação deverão criar por vias legais um Sistema de Gerenciamento Costeiro, normatizar o uso da sua zona costeira e definir sua área de atuação marítima

Resolução CONAMA N.º 06, de 17/10/1990 Dispõe sobre a produção, importação, comercialização e uso de dispersantes químicos empregados nas ações de combate aos derrames de petróleo e seus derivados, determinando que só poderão ser aplicados após prévia avaliação e registro junto ao IBAMA a quem atribuiu também o estabelecimento de procedimentos e exigências complementares. O IBAMA baixou a Portaria Normativa N.º 64, de 19/06/1992 que trata do registro provisório desses

dispersantes. Esta Resolução foi substituída pela Resolução CONAMA 269/00.

Portaria No 046 de 28/08/1996 do Ministério da Marinha Código Segurança Marítima Portaria da Diretoria e Portos e Costas (DPC). Aprova as diretrizes para implementação do Código Internacional de Gerenciamento para a Operação Segura de Navios e para a Prevenção da Poluição - Código ISM (International Safety Maritime), visando orientar as companhias de navegação e operadoras de navios na preparação de sistemas de gerenciamento de segurança, na sua implantação e manutenção.

Lei Federal No 9.478 de 06/08/1997 Cria Agência Nacional de Petróleo Cria a Agência Nacional de Petróleo (ANP) sendo uma das suas atribuições a de fazer cumprir as boas práticas de conservação e uso racional do petróleo, dos derivados, do gás natural e de preservação do meio ambiente. A portaria ANP 170 de 26/11/1998, art. 13 - estatui que a empresa ou concessionária autorizada comunicará imediatamente à Agência, a ocorrência de qualquer evento decorrente de suas atividades que possa acarretar riscos à saúde pública, à segurança de terceiros e ao meio ambiente, indicando as causas de sua origem, bem como as medidas tomadas para sanar ou reduzir o seu impacto. A empresa ou concessionária poluidora poderá ser autuada pela Agência "por não ter observado os requisitos de proteção ambiental e de segurança do tráfego" e até ser interditada. O não cumprimento no disposto nesta Portaria implicará em aplicação das penalidades previstas na Lei N.º 9.847, de 26 de outubro de 1999 e legislação complementar.

Lei Federal No 9.537 de 11/12/1997 Lei de Segurança do Tráfego Aquaviário (LESTA) Dispõe sobre a segurança do tráfego aquaviário em águas jurisdicionais brasileiras e dá outras providências. Abrange embarcações brasileiras, exceto as de guerra, os tripulantes, os profissionais não-tripulantes, e os passageiros nelas embarcados, ainda que fora das águas sob jurisdição nacional, como também as embarcações estrangeiras e aeronaves na superfície das águas sob jurisdição nacional. Aborda a atuação da praticagem, a obrigatoriedade de comunicação de acidentes e a apuração dos fatos tanto para navios como para plataformas Para acessar o texto original ver: Diretoria de Portos e Costas.

Decreto Legislativo No 2.508 de 04/03/1998 MARPOL Este decreto estabelece regras para a prevenção da poluição causada por óleo, por substâncias líquidas nocivas transportadas a granel, em fardos, containers, tanques portáteis ou vagões, tanques rodoviários e ferroviários e também por esgotos e lixo provenientes de navios. As normas estabelecidas dirigem-se aos navios, portos e terminais. Aprova, com reservas, os textos da Convenção Internacional para Prevenção da Poluição Causada Por Navios/Protocolo de 1978.

Decreto Legislativo No 43 de 01/06/1998 OPRC Ratifica a Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em Casos de Poluição por Óleo (OPRC 90) estabelecida pela IMO em 30/11/1990.

Lei Federal No 9.966 de 28/04/2000 Lei do óleo e de substâncias nocivas. Estabelece os princípios básicos a serem obedecidos na movimentação de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em portos organizados, instalações portuárias, plataformas e navios em águas sob jurisdição nacional. Aplica-se às embarcações e plataformas nacionais ou estrangeiras, portos, instalações portuárias e dutos.

Decreto Federal No 4.136 de 20/02/2002 Sanções às infrações previstas na Lei 9.966/00 Dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às infrações às regras de prevenção, controle e fiscalização da poluição causada por lançamento do óleo e outras substâncias nocivas e perigosas em águas sob jurisdição nacional prevista na Lei 9.966/00. Considera infração como a inobservância a qualquer determinação constante desta lei federal. As sanções variam de advertência e multa simples à suspensão parcial, total das atividades e restritiva de direitos. Ilustra quem são as pessoas físicas ou jurídicas que respondem pela infração, quem são as autoridades competentes para lavrar os autos de infração e dá outras providências a esse respeito.

Resolução CONAMA No 237 de 19/12/1997 Licenciamento Ambiental. Apresenta orientações aos órgãos ambientais pertencentes ao SISNAMA - Sistema Nacional de Meio Ambiente sobre os procedimentos relativos ao licenciamento de empreendimentos e atividades lesivas ao meio ambiente, considerando a Resolução CONAMA 011/94 e a Lei Federal 6.938/81. Estão inseridas neste contexto, entre

outras, atividades de perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural, fabricação e reparo de embarcações e estruturas flutuantes, produção de substâncias e fabricação de produtos químicos, fabricação de produtos derivados do processamento de petróleo, transporte de cargas perigosas, transporte por dutos, marinas e portos, terminais de petróleo e derivados e de produtos químicos, depósitos de produtos perigosos.

Resolução CONAMA No 269 de 14/09/2000 Dispersantes Químicos. Apresenta orientações sobre procedimentos e critérios para utilização de produtos químicos dispersantes no combate aos derramamentos de óleo no mar. Tanto esta resolução como seu respectivo anexo devem ser consultados e obedecidos pois, o não cumprimento do disposto neste documento sujeitará os infratores às penalidades previstas na legislação vigente. Os dispersantes precisam ser homologados pelo IBAMA, de acordo com sua eficiência e baixa toxicidade, e sua aplicação está condicionada a uma série de requisitos ambientais.

Resolução CONAMA No 293 de 12/12/2001 Plano de Emergência Individual. Com base na Lei Federal 9.966/00, apresenta orientações sobre o conteúdo mínimo que um Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo originados em portos organizados, instalações portuárias ou terminais, dutos, plataformas bem como suas respectivas instalações de apoio devem ter. Estes Planos devem ser apresentados ao órgão ambiental competente. Este texto é formado por três anexos.

Decreto Federal 4.871 de 06/11/2003 Planos de Áreas para combate à poluição por óleo. Dispõe sobre a instituição dos Planos de Áreas (PA) para o combate à poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional. Seu propósito é integrar e consolidar os Planos de Emergência Individual (PEIs) (Resolução CONAMA 293/01) das instalações que manuseiam óleo, situadas em uma mesma área, onde haja concentração de portos organizados, instalações portuárias ou plataformas e suas respectivas instalações de apoio. Visam aperfeiçoar, facilitar e ampliar a capacidade de resposta aos incidentes de poluição por óleo, como também orientar as ações

necessárias, quando a fonte for desconhecida (manchas órfãs). Sob coordenação do órgão ambiental competente, os responsáveis pelas instalações elaborarão os PAs, a partir dos PEIs, em articulação com instituições públicas e privadas. Os PAs, mencionados nos Artigos 7 e 8 da Lei Federal 9.966/2000, constituem mais um avanço no controle da poluição ambiental.

3 SISTEMA BASE DE MODELOS A SER APLICADO

O sistema de hidromodelagem a ser aplicado é o SisBAHIA (SisBAHIA é o acrônimo de Sistema BAse de HIdrodinâmica Ambiental) Trata-se de um sistema para modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de escalares passivos em corpos de água naturais. O sistema oferece recursos para modelamentos de corpos de água com superfície livre sem estratificação vertical significativa. Nesta classe de corpos de água pode-se encontrar rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras.

O sistema apresenta três modelos numéricos básicos :

1. Um modelo hidrodinâmico, o FIST3D que consta dos módulos 3D e 2DH, para simular a circulação hidrodinâmica em corpos de água rasos sob diferentes cenários. Considerando aplicações em corpos de água costeiros com pouca estratificação, como é o caso de várias baías e estuários na costa brasileira, o modelo não necessita da inclusão de gradientes de densidade. Para a maioria dos casos práticos, a simulação de campos de corrente promediada na vertical, bidimensional na horizontal (2DH), é adequada. Contudo, existem casos onde o conhecimento de perfis verticais de velocidade, de natureza tridimensional, se tornará necessário. Para isso, o sistema de modelagem hidrodinâmica contido no SisBAHIA é capaz de simular campos de corrente do tipo 2DH e 3D com densidade constante.

2. Um modelo de transporte Euleriano advectivo-difusivo do tipo 2DH, promediado na vertical, para simular o transporte de substâncias; contaminantes, ou parâmetros de qualidade da água que se encontram bem misturados ao longo da coluna d'água. Esse modelo em geral é mais útil para problemas de grande escala.

3. Um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo, para simular o transporte de substâncias, contaminantes, ou parâmetros de qualidade da água que possam estar bem misturados, ou ocupando apenas uma camada, na coluna d'água. Esse tipo de modelo é, na maioria das vezes, utilizado no estudo do transporte, relativamente local, de plumas ou nuvens de contaminantes originados a partir de

fontes de pequena escala. É também muito usado para estudos de correntes residuais ou visualização de misturas de massas de água de diferentes regiões do corpo de água sendo modelado.

3.1 MODELO MATEMÁTICO DA HIDRODINÂMICA

O modelo matemático a ser utilizado é o chamado equações de águas rasas as quais provem de simplificações físicas feitas as equações que governam o escoamento em regime turbulento, chamando estas simplificações como aproximações, as principais são explicadas a continuação.

3.1.1 Principais Aproximações

3.1.1.1 Mudança para um referencial solidário com a terra

Do ponto de vista prático é de maior utilidade usarem-se variáveis relativas a um referencial solidário com a terra, como é o caso do referencial x_1, x_2, x_3 da Figura 3.1. Este referencial é não inercial pois possui velocidade de rotação $\vec{\Omega}$ em relação ao referencial fixo e a sua origem desloca-se com movimento acelerado devido á sua translação.

A equação da continuidade não sofre alteração na passagem para este referencial uma vez que traduz apenas balanços de massa. Fica:

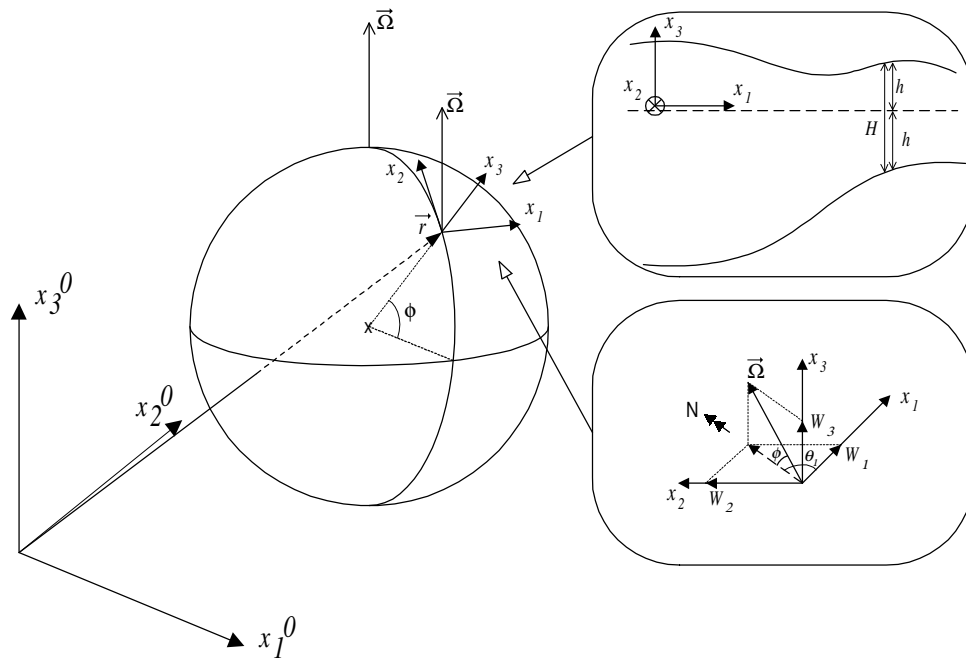
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

onde \vec{x} é o vetor posição no referencial acelerado. A passagem da equação de conservação da quantidade de movimento para um referencial acelerado faz aparecer explicitamente as forças de inércia. Para o caso geral de um referencial acelerado A

com origem \mathcal{P} e velocidade de rotação $\vec{\Omega}$ relativamente ao referencial de inércia I a aceleração de um ponto material nos dois referenciais está relacionada por:

$$\left[\frac{D\vec{u}^{\mathcal{P}_0}}{Dt} \right]_I = \left[\frac{D\vec{u}^{\mathcal{P}}}{Dt} \right]_A + 2\vec{\Omega} \times \vec{u}^{\mathcal{P}} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + \left[\frac{D}{Dt} \left(\frac{D\vec{F}^{\mathcal{P}}}{Dt} \right) \right]_I \quad (3.2)$$

FIGURA 3.1 - REFERENCIAIS UTILIZADOS



onde $\vec{u}^{\mathcal{P}_0}$ é o vetor velocidade do ponto material no referencial de inércia. Os últimos quatro termos representam acelerações aparentes que surgem quando se utiliza o referencial acelerado. O último termo contabiliza a aceleração linear do referencial A , que no caso do referencial x_1, x_2, x_3 é devida apenas à translação da Terra não se fazer com velocidade linear constante podendo ser desprezado. O penúltimo termo é nulo devido à velocidade de rotação da terra ser constante. O antepenúltimo termo representa a aceleração centrípeta. Este termo pode ser escrito na forma de um potencial sendo usualmente englobado na aceleração da gravidade (PEDLOSKY,

1987). O valor de g sofre assim uma alteração máxima no equador da ordem dos 0,3% passando a estar dirigido perpendicularmente ao geóide. Em termos práticos para a modelação hidrodinâmica pode considerar-se o valor de g constante. O termo $2\vec{\Omega} \times \vec{u}$ é a aceleração de Coriolis devendo ser incluída explicitamente nas equações de balanço de quantidade de movimento quando escritas no referencial x_1, x_2, x_3 onde atua como uma força mássica.

Em escoamentos oceânicos, para além da força aparente devida à aceleração de Coriolis, as únicas forças mássicas que influenciam o escoamento de forma significativa são, a força gravitacional terrestre e o potencial de maré. A gravidade produz a aceleração apenas com componente na direcção vertical. O potencial de maré é na realidade a resultante de um equilíbrio entre as forças mássicas de atracção da Terra, da Lua e do Sol e da força centrífuga aparente produzida pela rotação dos pares Terra-Lua e Terra-Sol em torno dos seus centros de massa. A resultante destas forças produz acelerações da ordem de 10^{-7} m/s^2 podendo-se por isso desprezar a componente vertical face à aceleração da gravidade. As componentes horizontais devem ser consideradas para a simulação da maré em escalas globais, sendo aí o principal forçamento, mas podem-se desprezar quando a dimensão do domínio é muito inferior ao comprimento de onda do forçamento que é aproximadamente metade do perímetro da Terra (MARTINS, 1999). A equação de conservação da quantidade de movimento escrita num referencial solidário com a Terra fica assim:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - 2\rho \varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k \quad (3.3)$$

onde ε_{ijk} é o tensor alternante.

Denominando ϕ a latitude e θ_1 o ângulo do versor \vec{e}_1 com a direcção Norte como esquematizado na Figura 3.1, as componentes do vetor velocidade de rotação $\vec{\Omega}$ são:

$$\vec{\Omega} = (\Omega \cos \phi \cos \theta_1) \vec{e}_1 + (\Omega \cos \phi \sin \theta_1) \vec{e}_2 + (\Omega \sin \phi) \vec{e}_3 \quad (3.4)$$

Admitindo que o eixo \hat{e}_2^p se encontra alinhado com a direção Norte ($\theta_1 = \pi/2$) o último termo da equação. fica:

$$2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k = 2(\Omega \cos \phi \cdot u_3 - \Omega \sin \phi \cdot u_2)\hat{e}_1^p + 2(\Omega \sin \phi \cdot u_1)\hat{e}_2^p + 2(-\Omega \cos \phi \cdot u_1)\hat{e}_3^p \quad (3.5)$$

onde $\Omega = |\hat{\Omega}^p|$. No oceano a componente vertical da velocidade é usualmente três ordens de grandeza inferior às componentes horizontais, podendo-se por esse motivo desprezar o primeiro termo da equação relativamente aos restantes. A Terra efetua uma revolução em 86164 segundos (um dia sideral) pelo que se tem $|\hat{\Omega}^p| = 2\pi/86164 = 7.29 \times 10^{-5} s^{-1}$. Considerando as componentes horizontais da velocidade da ordem de 1 m/s a aceleração de Coriolis tem, para latitudes médias, uma ordem de grandeza de $10^{-5} m/s^2$. Este valor é seis ordens de grandeza inferior à aceleração da gravidade pelo que se despreza usualmente o último termo da equação.. As acelerações horizontais são no entanto desta ordem de grandeza justificando-se a permanência das componentes horizontais. Introduzindo o parâmetro de Coriolis $f = 2\Omega \sin \phi$ a equação. fica:

$$2\varepsilon_{ijk}\Omega_j u_k = -fu_2\hat{e}_1^p + fu_1\hat{e}_2^p \quad (3.6)$$

3.1.1.2 Incompressibilidade

Se assume um escoamento incompressível se a densidade do fluido não muda com a pressão o qual é usual em líquidos. Consiste em considerar $D\rho/Dt \ll 1$, o qual dá-se para números de Mach menores que 0,3 (KUNDU,1990).

3.1.1.3 Fluido Newtoniano

Para a grande maioria dos fluidos, pode-se utilizar uma lei constitutiva que relaciona o tensor das tensões σ_{ij} de forma linear com o tensor das deformações e_{ij} definido por:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

A forma mais geral de impor essa dependência linear é pela lei de Cauchy-Poisson:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda^* e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (3.8)$$

onde δ_{ij} é o operador delta de Kronecker, p é a pressão e onde λ^* e μ são viscosidades moleculares dependentes do estado termodinâmico do fluido. Para o caso de fluido incompressível tem-se, $e_{kk} = \partial u_i / \partial x_i = 0$ e a relação constitutiva fica (MARTINS, 1999):

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.9)$$

3.1.1.4 Aproximação hidrostática

Partindo de que as escalas de movimentos horizontais no oceano são muito maiores que na vertical, é aceitável pensar que as acelerações verticais são pequenas com respeito aos outros termos que intervêm na equação de conservação da quantidade de movimento na direção vertical. Na realidade, e fazendo um análise da ordem de magnitude, os dois únicos termos que contribuem são o da pressão e o da gravidade (MONTERO, 1999). Esta equação fica reduzida ao balanço hidrostático das forças

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g \quad (3.10)$$

3.1.1.5 Aproximação de Boussinesq

Junto com a aproximação hidrostática é possível fazer a aproximação de

Boussinesq. Consiste em considerar que as acelerações do fluxo são menores que as da gravidade e portanto as variações da densidade só são importantes quando afetam os termos gravitacionais e não os termos de inércia.

3.1.1.6 Promediação das tenções turbulenta

O caráter turbulento do fluxo a analisar faz com que as equações da dinâmica não possam ser resolvidas nem analiticamente nem numericamente, pois as incógnitas são magnitudes instantâneas. As equações de conservação da massa, e conservação do movimento formam um sistema de 4 equações que permitem, em teoria, a determinação das 4 variáveis u_i, p . Estas variáveis são grandezas instantâneas, contínuas no espaço e no tempo de acordo com a hipótese de meio contínuo. Em termos práticos a solução direta deste sistema não é possível nem do ponto de vista analítico nem numérico. Analiticamente a natureza turbulenta (caótica) das equações faz com que uma solução determinística para as equações não seja possível, pelo menos para alguns tipos de sistemas (MOHAMMADI e PIRONNEAU, 1994). Do ponto de vista numérico a capacidade de cálculo restringe a quantidade de informação possível de processar, limitando por isso os processos que podem ser resolvidos no modelo numérico. Para a simulação direta de escoamentos turbulentos (sem fechamento turbulento) a resolução deve ser suficiente para descrever os turbilhões de menores dimensões que são da ordem da microescala de Kolmogorov. Desta forma são necessárias discretizações com um passo espacial de $10\ \mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$ e um passo temporal da ordem dos $100\ \mu\text{s}$. Para a solução de domínios reais estas discretizações obrigariam a uma capacidade de cálculo alguns milhões de vezes superiores aos disponíveis nos atuais supercomputadores (SPEZIALE, 1987).

A forma de contornar estas limitações consiste em considerar que o escoamento pode ser separado em duas partes: uma parte U_i, P , que varia de uma forma relativamente lenta sendo economicamente possível a sua análise, e uma parte u'_i, p' , sobreposta a esta na forma de uma perturbação, com uma variação tão rápida que não é economicamente possível ou desejável a sua resolução:

Tradicionalmente essa divisão é efetuada pela decomposição de Reynolds:

$$\begin{aligned} u_i(x_i, t) &= U_i(x_i, t) + u'_i(x_i, t) \\ p(x_i, t) &= P(x_i, t) + p'(x_i, t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Devido à natureza não linear das equações a aplicação desta decomposição não produz dois conjuntos separados de equações: As equações das grandezas resolvidas possuem termos onde figuram variáveis das perturbações e vice versa. É através desses termos que o campo das grandezas resolvidas interage com o campo das perturbações. O objetivo principal dos modelos de turbulência é o de descrever de uma forma simples, a partir das variáveis do campo resolvido, as interações entre estes dois campos de propriedades.

Define-se para isso uma operação de média que é aplicada às equações do movimento juntamente com a decomposição anterior. Essa média toma usualmente a forma de uma média no tempo para um ponto fixo no espaço. Na técnica LES (*Large Eddy Simulation*) usam-se no entanto médias no espaço para um determinado instante de tempo. Neste método obtém-se operadores com melhores características de filtragem que permitem definir qual a maior dimensão de turbilhão filtrado (ABBOTT e BASCO, 1989).

Uma variável resolvível, por exemplo u , é separada da variável completa, \tilde{u} , através de um procedimento de filtragem ou promediação. Pode-se mostrar que qualquer método padrão de promediação, como média de Reynolds, média temporal vicinal, e mesmo média estatística, pode ser escrito como um caso particular de um procedimento de filtragem generalizado, (ROSMAN, 1989). Esse procedimento de filtragem é feito através de uma integral de convolução entre a função de filtragem e a função da variável desejada. Para ilustrar o procedimento, considere a filtragem temporal de uma variável real, por exemplo o componente de velocidade \tilde{u} :

$$u(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}(t') G(t - t') dt' = \bar{\tilde{u}}(t) \quad (3.12)$$

Conforme indicado, $u = \bar{\tilde{u}}$ representa a parte filtrada ou resolvível da variável real. A barra acima \tilde{u} , indica a integral de convolução ou o procedimento de filtragem aplicado a variável real.

A função de filtragem pode ser qualquer função com média e variância finitas, satisfazendo a condição de preservação constante, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(\chi') d\chi' = 1 \quad (3.13)$$

onde χ representa qualquer dimensão. Existem várias funções de filtragem admissíveis; entre tanto foi demonstrado que as funções gaussianas possuem muitas vantagens, ABBOT e LARSEN (1985), DAKHOUL e BEDFORD (1986), ALDAMA (1985, 1990), ROSMAN (1987). Por isso, a formulação do modelo FIST3D emprega as seguintes funções de filtragem de espaço e tempo, conforme originalmente proposto por ALDAMA (1985):

$$G(x, y, z, t) = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_x} \exp\left(-6 \frac{x^2}{\lambda_x^2}\right) \times \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_y} \exp\left(-6 \frac{y^2}{\lambda_y^2}\right) \times \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_z} \exp\left(-6 \frac{z^2}{\lambda_z^2}\right) \times \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_t} \exp\left(-6 \frac{t^2}{\lambda_t^2}\right) \quad (3.14)$$

onde os parâmetros λ são as larguras dos filtros. Quanto maior a largura do filtro, maior a escala da variável resolvível. Para uma discussão geral sobre filtragem, vide por exemplo BEDFORD (1994), ALDAMA (1990), ROSMAN (1989, 1997). Um bom resumo também é apresentado em ABBOT e BASCO (1989).

3.1.1.7 Elevação da superfície livre

Para o cálculo da superfície livre ζ se usará um sistema de referencia solidário com a terra onde H é a profundidade total desde o fundo até a superfície, h é

a profundidade do fundo com respeito a um nível fixo de referência (usualmente é o zero hidrográfico) e ζ é a altura da superfície livre sobre este nível, como pode-se apreciar na Figura 3.2. Tendo em conta as condições de contorno para a velocidade vertical na superfície (denominada condições cinemáticas) e o fundo

$$\begin{array}{ll} \text{Superfície} & u_3 = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \quad i=1,2 \\ \text{Fundo} & u_3 = 0 \end{array} \quad (3.15)$$

e aplicando as à equação da continuidade uma vez integrada em toda a coluna da água, chega se a equação da superfície livre

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{-h}^{\zeta} u_i dx_3 \quad (3.16)$$

3.1.1.8 Velocidade vertical

Se calcula integrando a equação de continuidade entre o fundo e a altura onde se deseje conhecer o valor da velocidade vertical

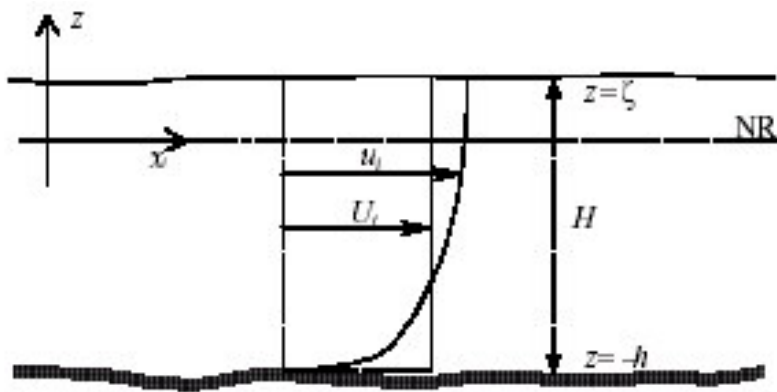
$$u_3(x_3) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{-h}^{x_3} u_i dx_3 \quad i=1,2 \quad (3.17)$$

3.1.2 Sistema de Equações para Águas Rasas

Apresenta se a continuação o sistema de equações utilizadas, após todas as aproximações anteriores para o modelo numérico 3D e 2D Essas equações são apresentadas a seguir com as seguintes notações de variáveis: u , v , e w , sendo

respectivamente as componentes do vetor velocidade nas direções x , y , e z . P é a pressão, ρ é a densidade local do fluido e ρ_0 é uma densidade constante de referencia. Φ é a velocidade angular de rotação da terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de latitude, τ_{ij} é o tensor de tensões turbulentas, ζ nível da superfície com respeito ao nível de referencia, h nível do fundo com respeito ao nível de referência.

FIGURA 3.2 - SISTEMA DE COORDENADAS DO SISTEMA DE MODELAGEM (3D & 2DH)



FONTE: ROSMAN, 2001

Equações 3D

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.18)$$

A equação (3.18) faz com que o divergente da velocidade do escoamento seja nulo. Ou seja, o volume das partículas no escoamento é incompressível e permanece o mesmo à medida que estas se movimentam.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (3.20)$$

Nas equações (3.19) e (3.20) os termos da equação significam:

$\frac{\partial u}{\partial t}$ Representa a aceleração local do escoamento.

$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$ Representa a aceleração advectiva do escoamento.

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ Representa a resultante da pressão hidrostática na direção de x .

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$ Representa a resultante da pressão hidrostática na direção de y .

$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)$ Representa a resultante das tensões turbulentas

dinâmicas no escoamento.

$2\Phi \sin \theta u$ Representa a força de Coriolis na direção de x devido ao fato do referencial estar se movimentando em relação a superfície da terra.

$2\Phi \sin \theta v$ Representa a força de Coriolis na direção de y devido ao fato do referencial estar se movimentando em relação a superfície da terra.

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad (3.21)$$

A equação (3.21) é a equação da continuidade integrada ao longo da vertical. Entretanto, da forma que encontra-se escrita á esquerda, pode-se observar que a altura da coluna d'água $(\zeta + h)$ varia no tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna d'água nas direções de x e y respectivamente.

Equações 2D

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^s - \tau_y^B) + 2\Phi \sin \theta U \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial (\zeta + h)}{\partial t} = -\frac{\partial UH}{\partial x} - \frac{\partial VH}{\partial y} \quad (3.24)$$

Nas equações (3.22), (3.23) e (3.24) os termos da equação significam:

$\frac{\partial U}{\partial t}$ Representa a aceleração local do escoamento, i.e. em uma dada posição, a

taxa de variação temporal do fluxo de quantidade de movimento 2DH por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$ Representa a aceleração advectiva do escoamento, i.e. em um

determinado instante, esses termos representam a taxa de variação espacial do fluxo de quantidade de movimento 2DH na direção x por unidade de massa.

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ Representa a pressão hidrostática resultante na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície d'água na direção de x . Conforme indicado pelo sinal negativo, o escoamento tende a ser de lugares onde o nível d'água é maior para lugares onde o nível d'água é menor.

$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right)$ Representa a resultante das tensões turbulentas

dinâmicas 2DH no escoamento.

$2\Phi \sin \theta V$ Representa a força de Coriolis devido ao fato do referencial estar se movimentando na superfície da terra.

$$\frac{1}{\rho_0 H}(\tau_x^s) \text{ Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de}$$

massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.

$$\frac{1}{\rho_0 H}(-\tau_x^b) \text{ Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento por}$$

unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} = -\frac{\partial UH}{\partial x} - \frac{\partial VH}{\partial y} \text{ A equação da continuidade 2DH, possui o mesmo}$$

significado da equação semelhante no módulo 3D.

3.1.3 Imposições das Condições Iniciais e de Contorno

O grupo de equações governantes no modelo FIST3D é formado por equações diferenciais parciais de primeira ordem em relação ao tempo e diferenciais parciais de segunda ordem em relação ao espaço. Dessa forma, uma condição inicial satisfaz todas as variáveis, mas, em alguns casos são necessários duas condições de contorno.

3.1.3.1 Condições iniciais

Para o modelo FIST3D, é necessário fornecer apenas as condições iniciais 2DH, U e V , para todos os nós do domínio. O FIST3D automaticamente gera as condições iniciais para o módulo 3D a partir desses valores 2DH, U e, para todos os nós do domínio. O FIST3D automaticamente gera as condições iniciais para o módulo 3D a partir desses valores 2DH, velocidade do vento e rugosidade equivalente do fundo, usando o módulo de solução analítica.

3.1.3.2 Condições de contorno

Para o sistema FIST3D tem de ser considerados contornos horizontais e verticais. Para o módulo 3D, as condições de contorno são velocidade zero no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de ventos dadas. Com relação aos contornos horizontais existem dois tipos: contornos de terras e contornos abertos. Contornos de terra em geral representam as margens do corpo de água e possíveis pontos com afluxo ou efluxo, como por exemplo rios e estuários. Contornos abertos geralmente representam os limites do domínio de água modelado, e não uma fronteira física. No FIST3D, a prescrição de fluxo/velocidade normais é usualmente associada a contornos abertos.

A condição típica para contornos de terra é a prescrição da componente do fluxo normal á fronteira em todos os seus pontos. Frequentemente, os contornos de terra não possuem contribuição externa e um fluxo/velocidade normal nulo é imposto. Entretanto, em nós posicionados na desembocadura de rios ou em pequenos estuários, o fluxo/velocidade especificado tem de ser dado.

3.2 MODELO MATEMÁTICO DO TRANSPORTE

O modelo de transporte a ser utilizado será o modelo de transporte Lagrangeano advectivo/difusivo, esse tipo de modelo tem a vantagem de ser facilmente aplicável a fontes de pequena escala e fortes gradientes. Para isso, um dado número de partículas é lançado na região fonte, em intervalos de tempos regulares. As partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes dominantes. A posição de qualquer partícula no instante seguinte, P^{n+1} , é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida, P^n .

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2P^n}{dt^2} + \text{T.A.D.} \quad (3.25)$$

onde T.A.D., são termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais de P são

obtidas a partir do campo de velocidades hidrodinâmico resolvível, ou de larga escala, conforme descrito a seguir:

$$\frac{dP}{dt} = \dot{V}(u, v, w) \quad (3.26)$$

$$\frac{d^2P}{dt^2} = \frac{d\dot{V}}{dt} = \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \dot{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \dot{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \dot{V}}{\partial z} \quad (3.27)$$

onde admite-se que as escalas resolvíveis ou velocidades advectivas das partículas, $\dot{V}(u, v, w)$, e as velocidades hidrodinâmicas obtidas do FIST3D são as mesmas. A inclusão dos termos de aceleração na determinação da posição é opcional, mas permite o uso de intervalos de tempo significativamente maiores, com boa acurácia. Após a determinação da nova posição de cada partícula, um desvio aleatório, causado pelo movimento em escala não resolvível que geram “velocidades difusivas”, pode ser incluído. A magnitude do desvio aleatório é função das derivadas espaciais das difusividades de quantidade de movimento (ROSMAN, 2000).

3.3 MODELO DE DECAIMENTO DO ÓLEO

O modelo utilizado no decaimento do petróleo é o ADIOS2 (Automated Data Inquiry for Oil Spills) desenvolvido pela NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration). O modelo avalia a quantidade óleo remanescente, densidade, viscosidade, conteúdo de água devido à emulsificação, óleo evaporado e benzenos. As equações que descrevem o modelo matemático foram expostas na seção alterações das propriedades e processos de envelhecimento do petróleo.

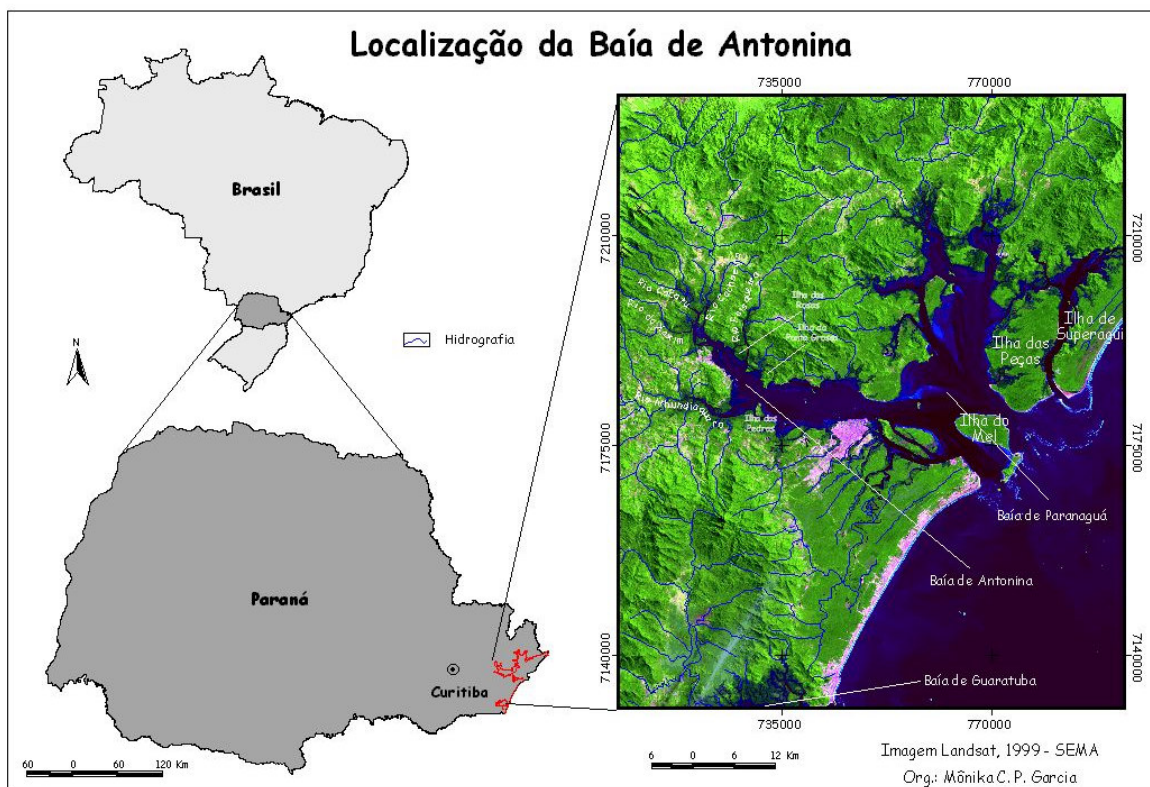
4 CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O Complexo Estuarino de Paranaguá localiza-se na porção Centro-Norte da planície costeira paranaense, tendo como limite Oeste a Serra do Mar e a Leste o Oceano Atlântico.

A área de estudo localiza-se no setor E-W do complexo estuarino de Paranaguá, englobando a Baía de Antonina e o setor ocidental da baía de Paranaguá. Especificamente a área de estudo esta delimitada entre os paralelos $25^{\circ}20'$ e $25^{\circ}35'$ de latitude Sul e $48^{\circ}30'$ e $48^{\circ}45'$ de longitude Oeste, a região pode ser vista na Figura 4.1.

FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO



4.2 CLIMA

O clima de uma região é resultado de um conjunto de fatores que atuam simultaneamente e em constante interação, sendo alguns de “ordem estática”, tais como posição e relevo, e outros de “ordem dinâmica” como os mecanismos atmosféricos (NIMMER, 1992).

Conforme IPARDES (1989), seguindo a classificação de Köppen, distingue-se na região litorânea e Serra do Mar do Estado do Paraná dois tipos climáticos: Cfa e Cfb.

O tipo Cfa se define como subtropical úmido mesotérmico, com verão quente. O mês mais frio apresenta temperatura média inferior a 18°C, porém superior a 3°C, e o mais quente, temperatura média superior a 22°C.

O tipo Cfb é definido como subtropical úmido mesotérmico, com verão fresco. O mês mais frio apresenta temperatura média inferior a 18°C, porém superior a -3°C, e o mais quente, temperatura média inferior 22°C.

O tipo climático Cfa ocorre na parte de baixa altitude do litoral, até aproximadamente a cota de 700 m, enquanto o tipo Cfb acima dessa altitude.

Devido à necessidade de entendimento dos mecanismos atmosféricos atuantes e seus fatores genéricos para compreensão do clima de qualquer região, mostra-se relevante a descrição dos mecanismos atmosféricos atuantes no continente sul americano responsáveis pelo clima da região sul do país, e, conseqüentemente, pelo clima regional do Estado do Paraná.

O panorama da circulação atmosférica da costa sul americana, partindo-se para um quadro mais amplo, é definido a partir dos seguintes centros de ação: os anticiclônicos, responsáveis pela individualização de massas de ar, e os depressionários.

Tratando-se diretamente da região sul, como centro de ação anticiclônica ou “centro de alta” tem-se o Anticiclone do Atlântico, responsável pela origem da Massa Polar.

Segundo IAPAR (1978), entre duas massa de ar ou duas “altas” existe

sempre uma zona de mais baixa pressão, que se constitui em uma descontinuidade para a qual convergem os ventos das duas massas de ar ou “altas”. Nessas descontinuidades, os ventos convergentes ou ciclônicos tornam o tempo instável e geralmente chuvoso, freqüentemente acompanhado de tempestades. Tais fenômenos são moveis e, por sua estrutura de deslocamento, apresentam-se como “correntes de circulação perturbada” conhecidas como sistemas frontais ou frentes polares.

A região sul do país é marcadamente influenciada pelas “correntes perturbadas” de noroeste e pelas “correntes perturbadas” de sul conhecidas por sistemas frontais ou frentes polares. CALLIARI e KLEIN (1993) afirmam que a dinâmica na costa sul brasileira é regulada, principalmente, pelos fenômenos associados á passagem de frentes meteorológicas ou frentes polares.

Durante o inverno, quando as condições de frontogênese são mais freqüentes, os avanços da frente polar são mais rigorosos, comumente atingindo latitudes baixas, em torno de 8° S - 10° S. Na primavera, suas incursões abrangem, via de regra, o Trópico de Capricórnio. No verão, a energia frontal é especialmente fraca, raramente se aproxima do trópico. No outono, embora se iniciem as condições de frontogênese, ela é impedida de avançar por ação dos sistemas intertropicais, que, sendo bastantes ativos nesta época, fazem-na regredir (IAPAR 1978).

4.3 DINÂMICA HÍDRICA

A circulação das baías de Paranaguá e Antonina é basicamente regida pelas correntes de maré e pelo aporte sazonal de água doce (KNOPPERS et al., 1987). Aos efeitos desses fatores motrizes somam-se ainda a influencia exercida pela geometria do corpo estuarino, pela salinidade e circulação da região costeira adjacente (KJERFVE, 1990; MIRANDA, 1996).

MARONE & JAMIYANAA (1997) classificam a maré do complexo Estuarino de Paranaguá como micromaré, predominantemente semi diurna com desigualdades diurnas, sendo a amplitude media de 1,8 m em situações de quadratura

e 1,7 m em períodos de sizígia. Ao analisarem um evento de maré meteorológica ocorrida em agosto de 1993, MARONE & CAMARGO (1994) constataram um nível de maré cerca de 80 cm acima do nível previsto e estimaram um volume de água represada no Complexo Estuarino de Paranaguá de $4,8 \times 10^8 \text{ m}^3$.

MANTOVANELLI (1999) observou que no setor E-W do complexo Estuarino de Paranaguá a propagação de maré ocorre de forma mista, sendo que as máximas velocidades de enchentes e vazante antecederam as respectivas preamares e baixamares em 1,8 a 2,8 h (sizígia) e 0,8 a 2,1 h (quadratura). Esta avaliação evidenciou uma apreciável estratificação vertical de salinidade durante o verão, tanto na sizígia como na quadratura, tornando-se fracamente estratificado somente em condições de baixo aporte e elevada intensidade das correntes de maré. Segundo a interpretação de KNOPPERS et al. (1987), o setor E-W do complexo estuarino de Paranaguá pode ser classificado como um estuário parcialmente misturado tipo 2, no diagrama Estratificação-Circulação de HANSEN & RATTRAY (1965).

NOERNBERG (2001) observou que o setor E-W do complexo estuarino de Paranaguá sofre maior influência do aporte de água doce de sua bacia de drenagem em relação ao eixo N-S, apresentando respostas mais rápidas e intensas aos processos relacionados á estratificação da coluna d'água, intrusão salina, aporte de sedimentos fluviais e formação da zona de máxima turbidez.

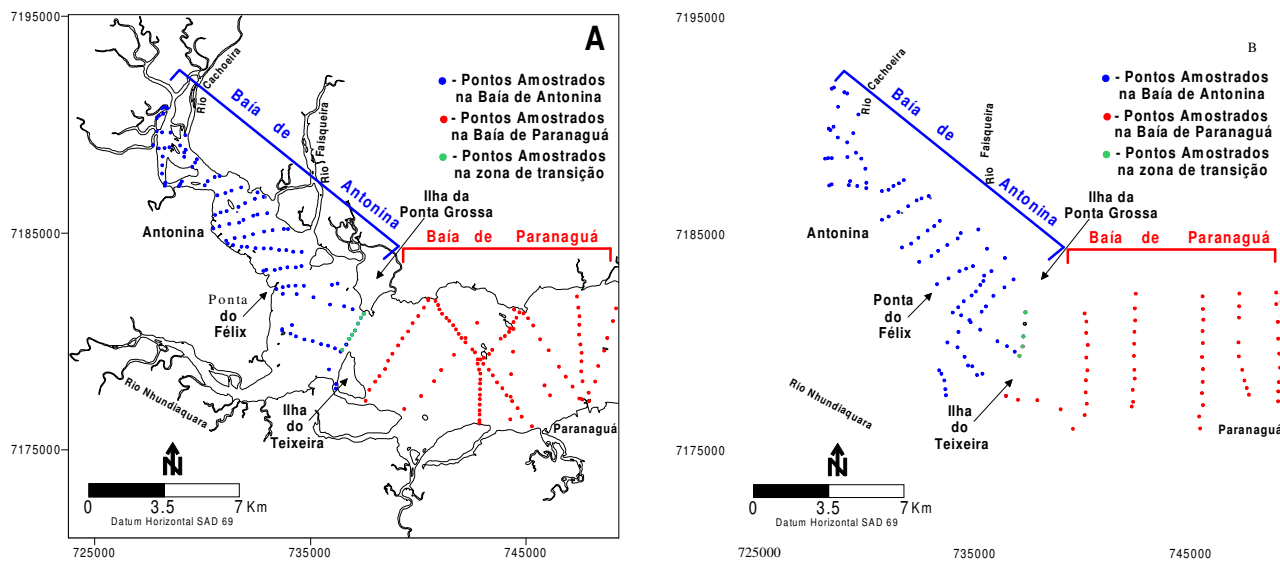
4.4 SEDIMENTO DE FUNDO

Em um abrangente trabalho, BIGARELLA et al. (1970 ; 1978) analisaram e descreveram 429 amostras de sedimento de fundo das baías de Paranaguá e Antonina, mapeando praticamente todo o setor E-W do complexo estuarino de Paranaguá, isto é possível apreciar na Figura 4.2 A. O autor observou que a composição do material de fundo da baía de Paranaguá foi dividida em três categorias fundamentais. Na primeira encontra-se o material procedente do retrabalhamento direto da planície costeira, constituído em excelência por areia fina. A segunda categoria engloba o material de

origem fluvial, composto por cascalho, areia, silte e argila. Na última categoria está o material biogênico proveniente do interior do sistema estuarino como as frações de matéria orgânica e de carbonato biodetrítico.

A distribuição das médias granulométricas analisadas por BIGARELLA et al (1970;1978) revelou que, a jusante de Paranaguá, a classe modal predominante situou-se na fração areia fina a muito fina, bem selecionada, sendo que o diâmetro médio e o grau de seleção tendem a diminuir em direção ao interior do estuário. Os mesmos autores observaram ainda que as frações mais grossas ocorrem preferencialmente associadas aos canais de maré, enquanto o material mais fino estava depositado nos ambientes de menor energia. Essa disposição revelou que a distribuição dos sedimentos de fundo é controlada pelo ambiente físico, principalmente pela profundidade e pelas correntes de maré.

FIGURA 4.2 - PONTOS AMOSTRADOS NA BAÍA DE ANTONINA, PORÇÃO OCIDENTAL DA BAÍA DE PARANAGUÁ E NA ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE AS DUAS BAÍAS EM 1966 (A) (BIGARELLA, 1978) E 1995 (B). (PETROBRAS, 1997)

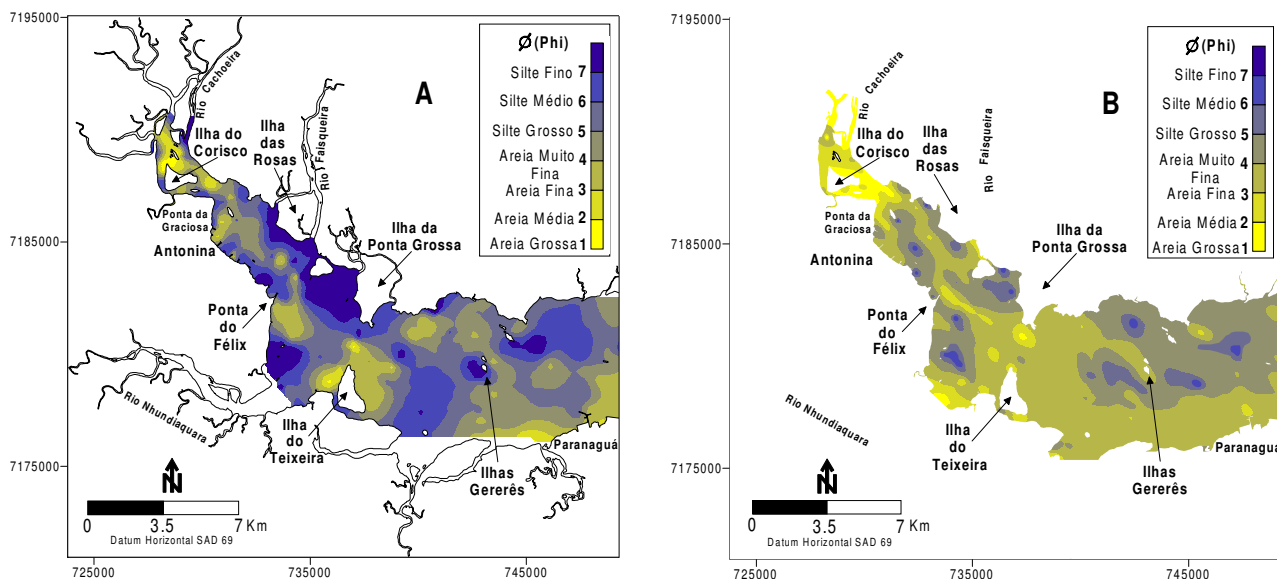


FONTE: ODRISKI, 2002.

Um novo levantamento dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá foi elaborado pelo projeto ‘Estudos Ambientais em Áreas Oceânicas e Costeira no Sul do Brasil’ (PETROBRAS, 1997), onde foram analisadas 353 amostras coletadas nas baías de Paranaguá e Antonina, isto pode-ser apreciado na Figura 4.2 B.

SOARES et al (1996) efetuaram uma avaliação desta amostragem e compartimentaram o setor E-W do complexo estuarino de Paranaguá em três setores principais : a) uma porção superior, á montante do estuário (Baía de Antonina) com grande influencia fluvial, composta por sedimentos muito heterogêneos, ocorrendo uma mistura de sedimentos arenosos e siltosos com baixo grau de seleção, sendo a porcentagem de finos superior ás demais porções do estuário; b) uma porção intermediaria com influencia fluvial e marinha, onde também delimita-se uma zona de máxima turbidez. Nesta zona também ocorre mistura das frações granulométricas, porém com menor influencia de finos que na parte superior do estuário; c) uma porção inferior, composta por areia fina a muito fina, moderadamente a bem selecionada, delimitada pela área de influência da desembocadura, onde ocorre efetiva ação marinha.

FIGURA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA BAÍA DE ANTONINA E SETOR OCIDENTAL DA BAÍA DE PARANAGUÁ EM 1966 (A) E 1995 (B)



FONTE: ODRSKI, 2002

Uma breve comparação dos resultados obtidos por BIGARELLA et al. (1970;1978) e pela PETROBRAS (1997) foi elaborada por SOARES et al. (1997) e APPA (1997), que observaram importantes mudanças na distribuição dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina. De modo geral, observou-se na porção

superior um aumento de porcentagem dos sedimentos arenosos, como observado na Figura 4.3, fato atribuído pelos autores aos desmatamentos ocorridos na Serra do Mar nas últimas décadas.

ODRESKI (2002) mediante estudos de dados batimétricos de 1901 e 1979, observou variações de até 5 metros em determinados pontos do estuário e estimou uma taxa de variação de 2,6 cm/ano, considerando uma deposição uniforme em toda a área abrangida pelos levantamentos batimétricos.

4.5 PRINCIPAIS RIOS

A região de estudo tem uma área de drenagem aproximadamente 1.700 km², nesta região duas bacias hidrográficas podem ser identificadas : a sub-bacia da baía de Antonina, que desemboca no eixo N-NW na cabeceira da baía de Antonina, cujo principal rio é o Cachoeira, e a sub-bacia do Nhundiaquara, que deságua no eixo S-SW da baía de Antonina, onde se destaca o rio Nhundiaquara (BIGARELLA et al., 1978; MARTIN, 1992). Esta área de drenagem engloba os municípios de Antonina, Morretes e Paranaguá (PR, Brasil).

Os rios destas sub-bacias nascem nas encostas da Serra do Mar, em altitude entre 100 e 1900 m, com costas da nascente superiores a 1000 m para os principais rios. Constituem cursos perenes em função da elevada e regular precipitação da região, da freqüente condensação de umidade atmosférica que se infiltra no solo e da umidade permanente do manto de intemperismo que abastece o lençol freático (BIGARELLA et al., 1978). Os pontos mais elevados situam-se nos divisores de drenagem da sub-bacia de Antonina (>1.800 m) (Soares et al., 1997). A alta instabilidade natural verificada na região de serras e morros, decorrente de sua acentuada declividade (>45°), associada ao grande desnível entre o planalto e o nível do mar, conferem à estas bacias litorâneas um alto potencial erosivo (ANGULO, 1992; OKA-FIORI & CANALI, 1998).

Para o estabelecimento da importância relativa dos principais rios da bacia

de drenagem das baías de Antonina e Paranaguá, no aporte de água, de acordo a Alessandra Mantonvanelli, realizaram-se duas campanhas de 2 a 3 dias, uma no inverno de 1997 e outra no verão de 1998. Nestas campanhas foram quantificadas as descargas de 20 rios, que representam 80% dos 1700 km², correspondente a área total da drenagem (até o porto de Paranaguá).

As duas campanhas ‘instantâneas de medições de vazão permitiram uma aproximação da representatividade relativa dos rios, em condições de baixo aporte de água doce (inverno 1997) e de elevado aporte (verão 1998). A deficiência hídrica, observada nos dias de amostragem no inverno, mostra que a manutenção do fluxo dos rios originou-se basicamente do estoque de água armazenado em períodos com excedente de água (LANNA, 1993). No verão, o excedente hídrico gerou a intensificação do aporte de água doce, a descarga de água doce medidas nestas duas campanhas descrevem situações específicas, não podendo ser generalizadas para condições médias, em função de sua alta variabilidade temporal já que nos meses de inverno de 1997, as precipitações foram superiores às médias históricas em 1,08 a 1,32 vezes, em Morretes, e de 1,22 a 1,74 vezes, em Antonina, excetuando-se o mês de julho, que representou somente 50% do valor médio e, nos meses de verão de 1998, em 1,04 a 1,60 e 1,20 a 1,34 vezes, respectivamente em Morretes e Antonina.

O rio Cachoeira constituiu o principal aporte de água para a baía de Paranaguá, especialmente durante o inverno. Neste período, as vazões dos rios Cachoeira e Nhundiaquara somaram 82% do total.

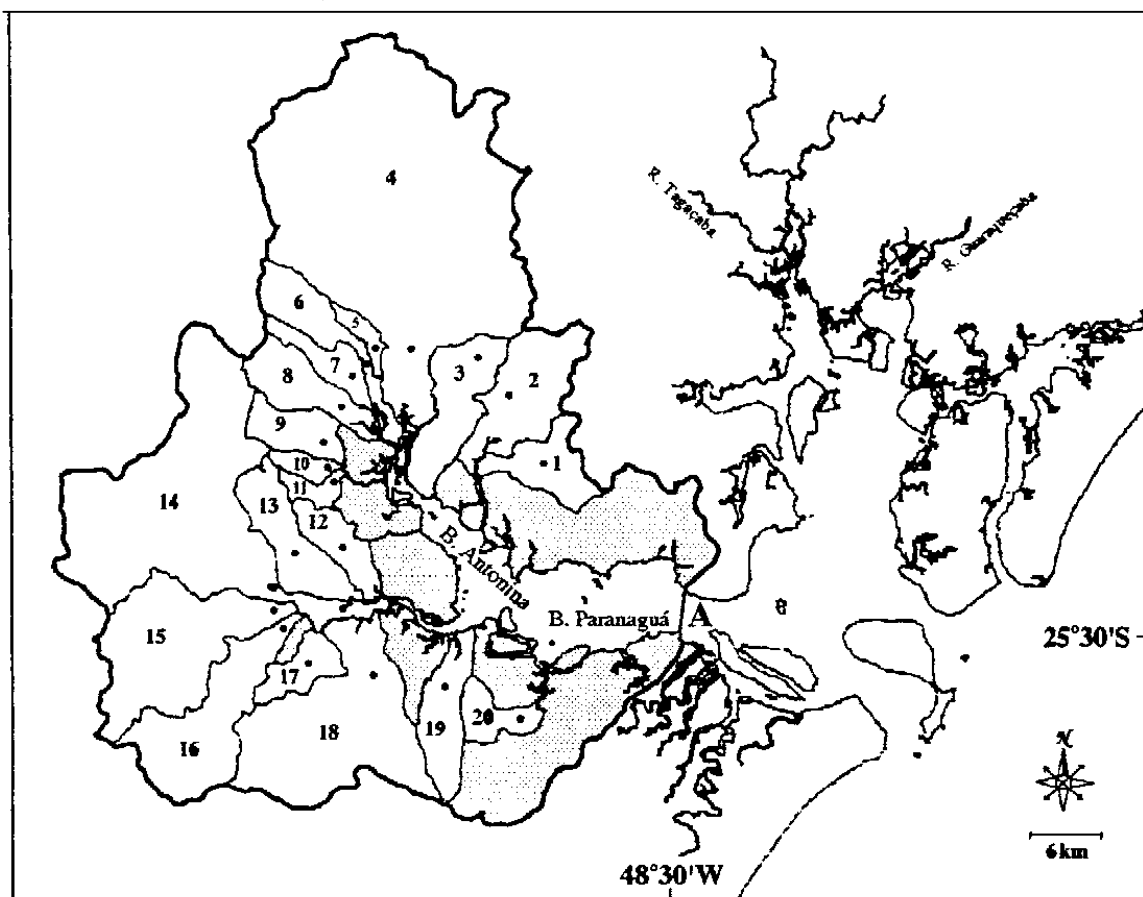
Na quase ausência de precipitação, a vazão dos rios ($< 3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) foram extremamente reduzidas, excetuando-se o rio Cachoeira. O rio Cachoeira provavelmente seja diferente dos demais com relação a sua capacidade de armazenamento, em função do maior tamanho de sua bacia de drenagem e do controle do fluxo exercido na barragem da Represa do Capivari (Usina hidroelétrica Parigot de Souza). Segundo CURCIO et al. (1998), a vazão do rio Cachoeira dobrou após a transposição da descarga do rio Capivari para o mesmo.

No verão, cresceu a contribuição dos demais rios no aporte de água doce,

especialmente nos rios Nhundiaquara e Marumbi, que juntamente com o rio Cachoeira representam 66% da vazão total.

As tabelas das vazões das campanhas de verão de 1997 e inverno de 1998 e áreas totais das bacias de drenagem podem ser vistas nas tabelas 4.1 e 4.2 assim como também a área de drenagem na Figura 4.4, onde a delimitação das sub-bacias dos rios: (1) Cedro, (2) Faisqueira, (3) Cupiúva, (4) Cachoeira, (5) Venda, (6) Cacatu, (7) Meio, (8) Nunes, (9) Xaxim, (10) Curitibaba, (11) Moura, (12) São Joãozinho, (13) Sapetanduva, (14) Nhundiaquara, (15) Marumbi, (16) Pinto, (17) Passa Sete, (18) Sagrado, (19) Jacareí e (20) Piedade.

FIGURA 4.4 - ÁREA DE DRENAGEM. OS PONTOS NO INTERIOR DAS SUB-BACIAS REPRESENTAM O LOCAL DE MEDIÇÃO E A REGIÃO PONTILHADA À ÁREA ONDE O APORTE NÃO FOI DIRETAMENTE QUANTIFICADO



FONTE: MANTOVANELLI, 1999

TABELA 4.1 - DADOS DE VAZÃO E ÁREA TOTAL DAS BACIAS DE DRENAGEM DOS PRINCIPAIS RIOS QUE DESEMBOCAM NAS BAÍAS DE ANTONINA E PARANAGUÁ (ATÉ A PROXIMIDADE DA CIDADE DE PARANAGUÁ), NA CAMPANHA DE INVERNO DE 1997 (DIAS 13, 15 E 16/08/97)

rio	$Q_T(m^3 s^{-1})$	área total (km^2)
Cachoeira	25.34	415.13
Nhundiaquara	2.36	223.93
Sagrado	0.40	136.03
Marumbi	0.69	107.93
Pinto	0.61	80.61
Faisqueira	0.50	58.17
Sapetanduva	0.11	43.91
Nunes	0.56	36.94
Cacatu	0.44	36.36
Jacareí	0.15	34.29
Rio do Cedro	0.44	31.46
Cupiúva	0.10	26.08
Xaxim	0.10	25.54
São Joãozinho	0.00	24.22
Passa Sete	0.03	20.79
Rio do Meio	0.00	19.80
Piedade	0.27	18.07
Moura	0.02	9.72
Curitibaíba	0.05	9.14
Rio da Venda	0.43	9.04

FONTE: Adaptado de MANTOVANELLI, 1999

TABELA 4.2 - DADOS DE VAZÃO E ÁREA TOTAL DAS BACIAS DE DRENAGEM DOS PRINCIPAIS RIOS QUE DESEMBOLCAM NAS BAÍAS DE ANTONINA E PARANAGUÁ (ATÉ A PROXIMIDADE DA CIDADE DE PARANAGUÁ), NA CAMPANHA DE VERÃO DE 1998 (DIAS 12, E 16/08/97).

rio	$Q_T(m^3 s^{-1})$	área total (km^2)
Cachoeira	46.85	415.13
Nhundiaquara	34.95	223.93
Sagrado	7.15	136.03
Marumbi	12.46	107.93
Pinto	5.14	80.61
Faisqueira	5.82	58.17
Sapetanduva	3.53	43.91
Nunes	2.62	36.94
Cacatu	7.23	36.36
Jacareí	3.34	34.29
Rio do Cedro	2.92	31.46
Cupiúva	2.51	26.08
Xaxim	2.07	25.54
São Joãozinho	1.24	24.22
Passa Sete	0.82	20.79
Rio do Meio	0.61	19.80
Piedade	1.71	18.07
Moura	0.48	9.72
Curitibaíba	0.33	9.14
Rio da Venda	1.81	9.04

FONTE: Adaptado de MANTOVANELLI, 1999

5 DADOS DO COMPLEXO ESTUARINO ANTONINA PARANAGUÁ

Para a formulação dos dados iniciais do modelo assim como também para os processos de calibração e validação medições de dados são requeridas. Neste capítulo os dados disponíveis da região de estudos são apresentados.

5.1 BATIMETRIA

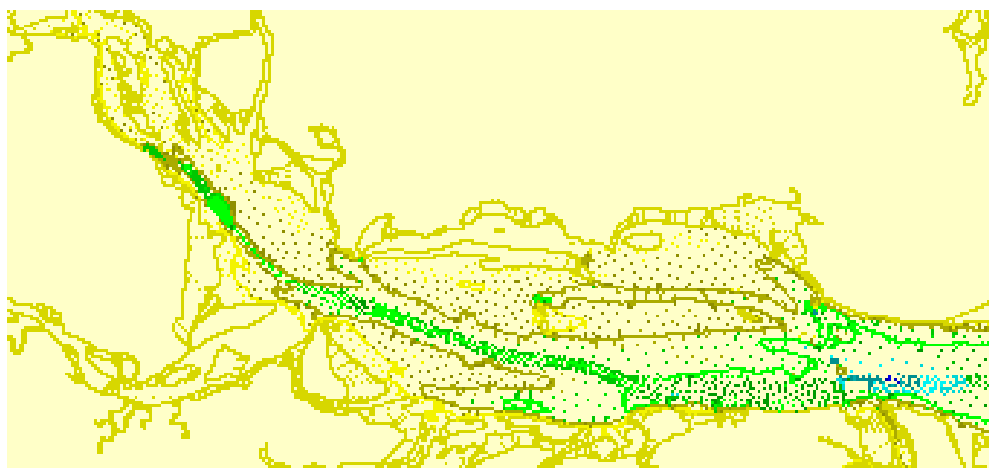
Os dados batimétricos utilizados nesse trabalho foram gerados a partir de três diferentes fontes:

1. A digitalização da carta Náutica 1824 (DHN, 1995), com levantamentos efetuados em 1979.
2. Interpretação de imagens de satélite. Imagens do TM Landsat 5 e TM Landsat 7.
3. Dados obtidos com ecobatímetro (CEM, 2002).

O conjunto de dados gerados com a digitalização da carta náutica constitui a base dos dados. A análise batimétrica efetuada com auxílio das imagens de satélite constituíram um refinamento dos dados digitalizados, no sentido de se efetuar uma melhor delimitação da linha da costa, bancos de areia.

A Figura 5.1 mostra o conjunto de dados batimétricos disponíveis. A área de maior interesse do trabalho, o ramo que se estende na direção Leste Oeste, e que engloba os portos de Paranaguá e Antonina é densamente amostrado em especial o canal de navegação.

FIGURA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DOS DADOS BATIMÉTRICOS



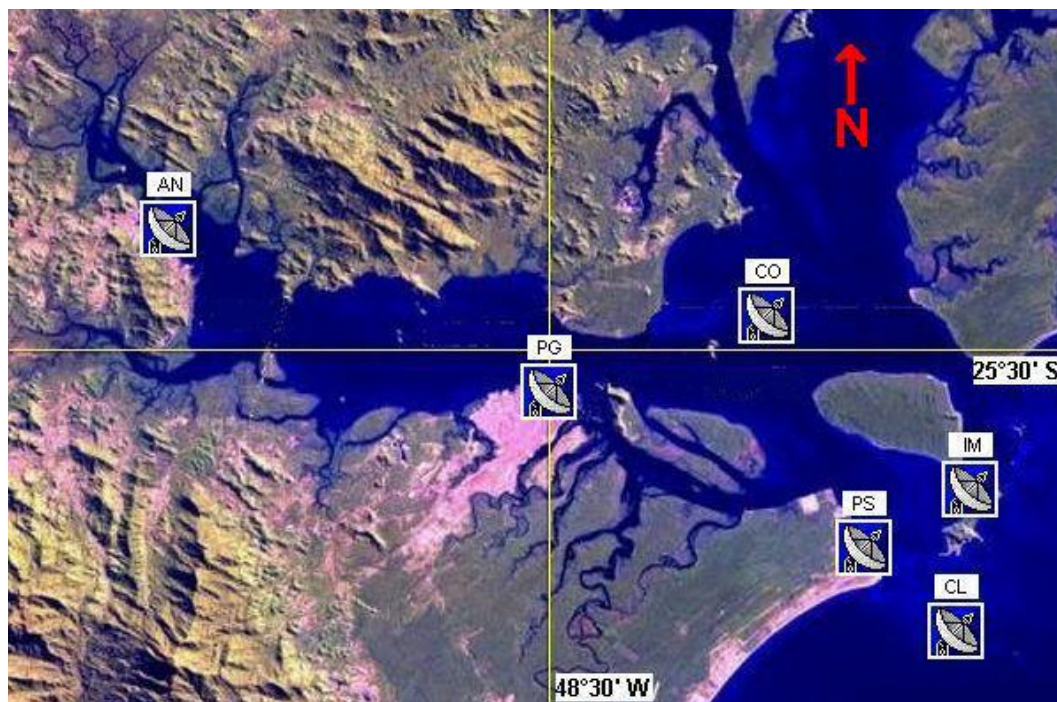
FONTE: CEM, 2003.

5.2 NÍVEIS DE ÁGUA

As medições de níveis de água são de grande importância para a calibração e validação do modelo.

A elevação da superfície da água é medida em dois pontos do complexo estuarino em estudo, no porto de Paranaguá na posição $25^{\circ}30.1'S$, $48^{\circ}30.2'W$ e no porto de Antonina na posição $25^{\circ}26.5'S$, $48^{\circ}41.6'W$ como indicado na Figura 5.2. Estas medições foram feitas pelo Centro de Estudos do Mar (CEM, 2003). As series temporais são disponíveis para os anos de 1995 a 2000.

FIGURA 5.2 - LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÕES



FONTE: CEM, www.cem.ufpr.br

5.3 VENTO

Na região de estudo existem dois pontos de monitoramento do campo de vento:

1. Estação meteorológica mantida pelo Centro de Estudos do Mar localizada na sua sede em Pontal do Paraná.
2. Estação meteorológica mantida pelo instituto tecnológico SIMEPAR, localizada no município de Antonina.

Tanto a série temporal gerado no CEM quanto a gerado pelo SIMEPAR possuem resolução horária, sendo que os dados de vento do CEM estão disponíveis para o período de 1996 a 2000, o período coberto pelos dados do SIMEPAR compreende o ano 2000.

SOARES (1990) realizou estudo de dados de vento, fornecidos pelo INPH (1988) para a localidade de Pontal do Sul, para o período de Agosto/1982 a

dezembro/1986 observando que a direção predominante variou de E e SE, perfazendo 41,3% do total registrado, com velocidades entre 4 e 6 m/s correspondendo a 62,9% das ocorrências.

Os ventos da região são predominantemente da direção ENE, E, ESSE, SE com intensidade média de 4 m/s (CAMARGO, 1998).

O modelo será forçado com velocidade de vento predominante de acordo a bibliografia disponível.

5.4 VELOCIDADES DE CORRENTE

Os dados de corrente tanto magnitude quanto direção são obtidos mediante medições de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Estes instrumentos utilizam o princípio de efeito Doppler para obter a velocidade das partículas em suspensão: emitem ondas de som a uma frequência fixa e recebe de retorno o eco emitido pelas partículas em suspensão. Quando as partículas em suspensão se movem em direção do ADCP, as ondas de som capturadas pelo receptor do ADCP são de frequências mais altas. A diferença entre a frequência emitida e recebida é proporcional a velocidade relativa entre ADCP e as partículas em suspensão. O ADCP possui quatro emissores, um emissor para cada componente de velocidade da corrente e um emissor adicional que mede novamente a componente vertical da velocidade com o fim de medir o erro na medição. Durante a medição se utiliza o software do instrumento para configurar, controlar, registrar e visualizar os dados.

As medições com o ADCP foram realizados durante os anos 2000 e 2002. A seção de interesse, conforme mostrado na Figura 5.3, foi percorrida duas vezes pelo bote, uma vez em maré vazante e a outra em maré enchente. As campanhas de medição foram realizadas pelo Centro de Estudos Marinho (CEM) em Pontal do Sul.

FIGURA 5.3 - REGIÃO DE COLETA DE VELOCIDADES DE CORRENTE



FONTE: HERRLING, 2003.

5.5 DESCARGA DE RIO

As descargas de rio utilizados no domínio do modelo são estimadas baseados nos dados proporcionados na literatura.

Dados de medições de campo do inverno de 1997 e o verão de 1998 dos principais rios da região de estudo são obtidos de MANTOVANELLI, (1999). os valores de vazões a ser utilizados são apresentados na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – RIOS A SER UTILIZADOS NA MODELAGEM

rio	$Q_T(m^3 s^{-1})$	área total (km^2)
Cachoeira	46.85	415.13
Nhundiaquara	34.95	223.93

FONTE: MANTOVANELLI, 1999

5.6 CONSTITUINTES ASTRONÔMICAS

A Tabela 5.2 mostra a amplitude e a fase das 12 principais constituintes de maré, obtidas a partir da análise harmônica de séries temporais de elevação da superfície do mar no Porto de Paranaguá e Antonina feitas por CAMARGO (1998).

Esse conjunto de constituintes harmônicas serão utilizadas como condições no contorno aberto do modelo no caso de Paranaguá e parâmetro de aferição no caso de Antonina.

TABELA 5.2 - CONSTANTES HARMÔNICAS DE ELEVAÇÃO DE MARÉ: AMPLITUDES (EM CM) E FASES EM RELAÇÃO A GREENWICH (EM GRAUS) PARA OS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA

	Porto de Paranaguá		Porto de Antonina	
	H	GW	H	GW
Q1	3,54	112,36	3,48	074,47
O1	11,14	126,98	12,00	121,96
K1	6,59	188,81	10,14	171,79
P1	2,29	202,54	3,36	168,06
N2	7,74	253,24	8,29	260,39
M2	46,08	190,90	53,72	194,64
S2	31,73	197,61	36,76	204,60
K2	10,61	177,24	10,00	205,40
M3	14,78	037,52	22,19	055,94
MN4	6,64	050,18	8,85	060,94
M4	14,46	103,57	22,69	114,66
MS4	6,53	197,56	10,88	233,22

FONTE: CAMARGO, 1998.

6 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS

Nessa seção serão apresentadas as principais etapas da implementação do sistema de modelagem SisBAHIA e modelo de decaimento ADIOS2.

Como comentado anteriormente esse sistema é composto por um conjunto de ferramentas que auxiliam na fase de implementação do modelo numérico. As principais ferramentas que compõem o sistema SisBAHIA são:

- Ferramenta de geração de malha Argus.
- Ferramenta de interpolação da batimétrica nos pontos da grade numérica - SURFER.

Via de regra, a implementação de um modelo numérico hidrodinâmico segue as seguintes etapas:

- (1) Geração da malha numérica
- (2) Interpolação dos dados batimétricos nos pontos da malha numérica.
- (3) Definição das condições iniciais.
- (4) Definição das condições de contorno.
- (5) Definição das forçantes.

6.1 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO

Primeiramente se introduz no modelo dados da malha numérica, batimetria, condições iniciais e de contorno. Uma vez concluídas essas etapas é conveniente efetuar uma análise de sensibilidade do modelo referente aos seus parâmetros físicos e numéricos para depois se efetuar a calibração. Concluída a calibração, é possível efetuar simulações com diferentes combinações de forçantes (cenários), e obter o campo hidrodinâmico resultante. Os campos de velocidade gerados em cada um dos cenários são então utilizados nas simulações do transporte Advectivo-Difusivo do petróleo.

A simulação da perda de massa do petróleo é efetuada com a ajuda do modelo de decaimento ADIOS2, o qual leva em consideração o tipo do óleo, a temperatura da água, temperatura do ar, velocidade do vento e velocidade média dos fluxos.

As informações necessárias à implementação do modelo com a malha numérica, campo batimétrico, condições iniciais e de contorno, dados usados como forçantes, dados usados para aferição, assim como os processos de análise de sensibilidade e calibração serão descritos a seguir.

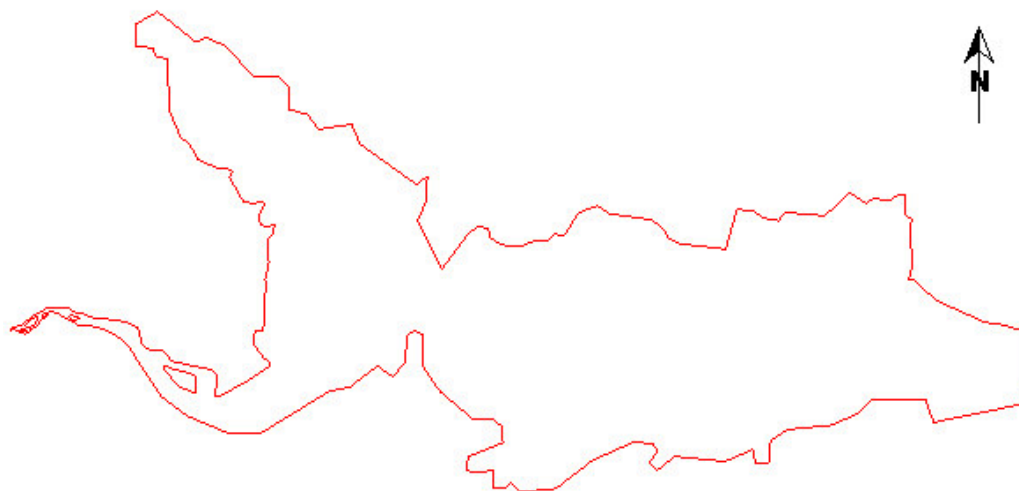
6.1.1 Geração da Malha Numérica

O SisBAHIA é um modelo numérico de elementos finitos, o que permite a utilização de grades numéricas que acompanham o contorno físico da região modelada. A construção desse tipo de grade é uma tarefa um tanto complicado e requer a utilização de ferramentas gráficas.

O contorno físico da região modelada foi obtido através da digitalização da carta náutica 1829 da DHN.

A digitalização e o georeferenciamento foram realizados com auxílio do AUTOCAD, a Figura 6.1, mostra o vetor resultante do contorno físico da região.

FIGURA 6.1 - CONTORNO DA REGIÃO A SER MODELADA



O modelo digital do contorno da região de interesse é então importado para a ferramenta gráfica Argus com o objetivo de gerar a malha numérica através da discretização da superfície em elementos quadrangulares.

Para a região em análise foram elaboradas três malhas numéricas com as seguintes características:

TABELA 6.1 - CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS ANALIZADAS

Malha	Número de elementos	Passo de Tempo (s)
Primeiro	150	10
Segundo	366	10
Terceiro	848	10

O objetivo da elaboração de três malhas numéricas se baseia no fato da necessidade verificar a influência dos parâmetros numéricos que neste caso é a resolução espacial da malha. Depois da análise de sensibilidade numérica se decide por uma das três malhas.

6.1.2 Interpolação da Batimetria

A interpolação batimétrica foi feita com base na carta náutica mediante a técnica de kriging.

A técnica de kriging pode ser definida como uma técnica de interpolação que pondera valores de pontos conhecidos, para determinar valores intermediários de pontos não conhecidos, considerando a relação espacial (covariância) entre as amostras (OLEA, 1991).

6.1.3 Dados Utilizados no Modelo

Os dados utilizados na implementação do modelo podem ser classificados em dois grupos:

- Dados usados como forçantes

Os dados utilizados como forçantes na implementação do modelo são o vento, elevação de nível do mar no Porto de Paranaguá, constantes harmônicas no porto de Paranaguá e descarga dos principais rios da região.

- Dados usados para aferição

Os dados utilizados para aferição temos as seções de velocidade coletadas com ADCP, constantes harmônicas obtidas para o porto de Antonina.

6.1.4 Condições Iniciais e de Contorno

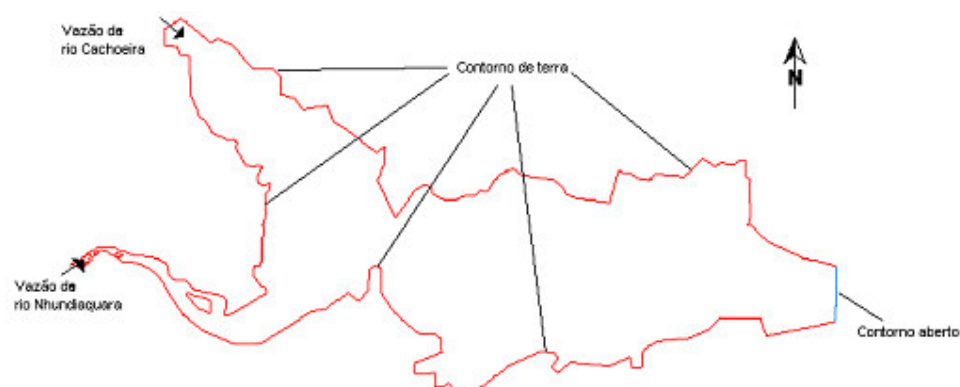
A existência e unicidade de uma solução para as equações de águas rasas, que forma o modelo matemático hidrodinâmico de um determinado corpo da água, é rigorosamente dependente de um grupo consistente de condições iniciais e de contorno. Algumas publicações fundamentais sobre o assunto são DAUBERT e GRAFFER (1967), VERBOOM et al. (1982). Para o problema de circulação hidrodinâmica Barotrópico resolvido pelo SisBAHIA, é necessário o estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidade e elevação da superfície livre da

água.

A imposição da elevação da superfície livre, ou níveis de água é geralmente o principal forçante prescrito ao longo dos contornos abertos.

Os contornos de terra representam margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem. Imposição de valores de vazões serão prescritas ao longo de o contorno de terra. A Figura 6.2 ilustra os dois tipos de contorno.

FIGURA 6.2 - CONTORNOS DE TERRA E ABERTO



Além dos contornos horizontais ilustrados, quando o escoamento estiver sendo resolvido, devem ser consideradas também condições de contorno na superfície e no fundo. A condição de contorno no fundo é a imposição de velocidade nula. No limite superior da coluna da água, a condição é a prescrição da tensão do vento.

Para corpos de água que aceitam a aproximação de águas rasas, para se evitar efeitos de camada limite, a condição de contorno típica em fronteiras de terra é a especificação da componente de velocidade (U_N) ou de fluxo (Q_N) normal ao contorno. E a condição típica em contornos abertos é a prescrição da elevação da superfície livre ao longo do contorno aberto em qualquer instante.

6.1.4.1 Condições iniciais

A condição inicial utilizada consiste em especificar o campo de velocidade nulo ($u=0$, $v=0$, $w=0$) em todos os pontos de grade, e o campo de elevação igual a zero em relação ao nível médio do mar em todo o domínio. Este tipo de condição inicial é chamado Dirichlet, o qual consiste em especificar diretamente os valores das propriedades em todo o domínio durante o arranque.

6.1.4.2 Condições de contornos abertos

As condições a serem impostas no contorno aberto são as elevações da superfície livre da água de acordo as constantes harmônicas para o porto de Paranaguá. Estas constantes foram descritas na Tabela 4.2.

6.1.4.3 Condições de contornos de terra

A condição de contorno de terra é a de fluxo normal nulo devido a se considerar impermeável, e no caso de embocaduras de rios, a velocidade normal é imposta nos nós que o representam. A Figura 6.2 mostra os contornos de terra considerado na região a ser modelada e a região de embocaduras dos rios Nhundiaquara e Cachoeira a ser tomados em contado.

6.1.5 Testes de Sensibilidade do Modelo

O objetivo do estudo de sensibilidade do modelo é conhecer o seu comportamento global e sua resposta a mudanças dos parâmetros físicos e numéricos. A variação dos parâmetros deve ser feita dentro de um intervalo real. O efeito destas mudanças se verifica para os níveis de água e a velocidade do fluxo com pontos de monitoramento distribuídos na área total do estudo. A análise de sensibilidade permite fixar os valores dos parâmetros numéricos que se devem utilizar para que o comportamento do modelo se considere adequado.

Na análise dos resultados do modelo deve-se desconsiderar a informação gerada no período de iniciação da rodada, que deve ser suficientemente longo para que o efeito sobre o padrão de fluxo das condições iniciais impostas no domínio do modelo desapareça por completo. Este tempo de iniciação varia dependendo da escala do modelo e do tipo de condições de fronteira que se utilizem. Deve-se identificar este tempo de iniciação antes de começar a análise (PALACIO, 2002). Em nosso caso foram desconsideradas as primeiras 24 horas de modelagem.

6.1.5.1 Verificação global do modelo

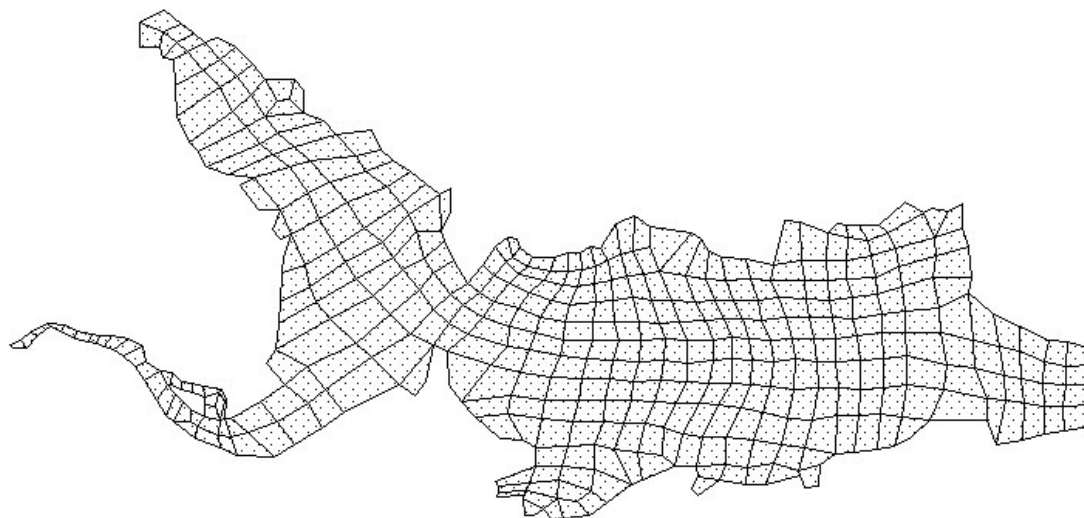
Neste passo inicial o modelo deve rodar com parâmetros físicos padrões e com um conjunto inicial de condições de contorno. Os resultados do modelo neste primeiro passo devem mostrar suavidade nas curvas de níveis da água e velocidades, padrões de fluxo reais, e não se devem apresentar padrões de fluxo irreais no interior do modelo nem na fronteira. As magnitudes absolutas dos níveis da água e as velocidades não são importantes neste passo preliminar.

6.1.5.2 Sensibilidade do modelo a mudanças nos parâmetros numéricos

Na análise das três malhas geradas para observar a influência da resolução deste no comportamento do modelo, obteve-se a malha com 366 elementos com passo espacial de 177m a 1412m como a malha de melhor performance. Para fazer esta eleição foram comparadas series temporais de níveis da água em estações dentro das três malhas analisadas mantendo constante os parâmetros numéricos e físicos. Como resultado desta análise se obteve a malha de 366 elementos, e com 1669 nós, como a malha a ser utilizada na simulação pois otimiza o tempo de computação e também reproduz estavelmente os níveis esperados em comparação às malhas de maior resolução. A malha a ser utilizada apresenta se na Figura 6.3

Os dados desta análise são apresentados em apêndice.

FIGURA 6.3 - MALHA COM 366 ELEMENTOS



6.1.5.2.1 Efeito do intervalo de tempo

Nesta análise o objetivo é identificar um valor adequado para o passo na escala do tempo. A análise foi realizada na grade de 366 elementos de resolução variando unicamente o passo de tempo de 60, 50, 40, 30, 20 e 10 segundos e observando as variações nas séries temporais de níveis na estação 377 dentro da região. Para estas estações se obteve os níveis para os diferentes passos de tempo como mostrados nos Gráficos 6.1 e 6.2. Através destas séries temporais se conclui que o passo de tempo adequado é 40 segundos. Este passo de tempo mantém estável o modelo e também não influencia no resultado das equações resolvidas pelo modelo. É possível observar que com o passo de tempo aumentando existe uma ligeira divergência do nível obtido com respeito ao nível anterior, porém o esquema autoajustável faz com que o resultado oscile entre valores das curvas para os passos de tempo 10 segundos e 40 segundos. Isto pode ser observado no Gráfico 6.2.

Não se observa grande diferença quando se usa intervalo de integração de 60

segundos ou 10 segundos. Assim será usado o intervalo de 40 segundos, pois é o intervalo que promove o menor custo computacional.

GRÁFICO 6.1 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO

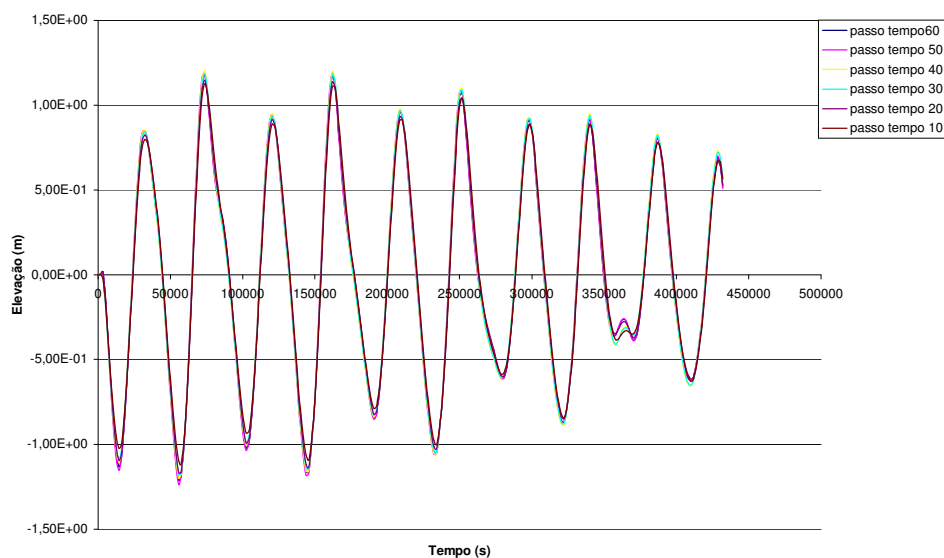
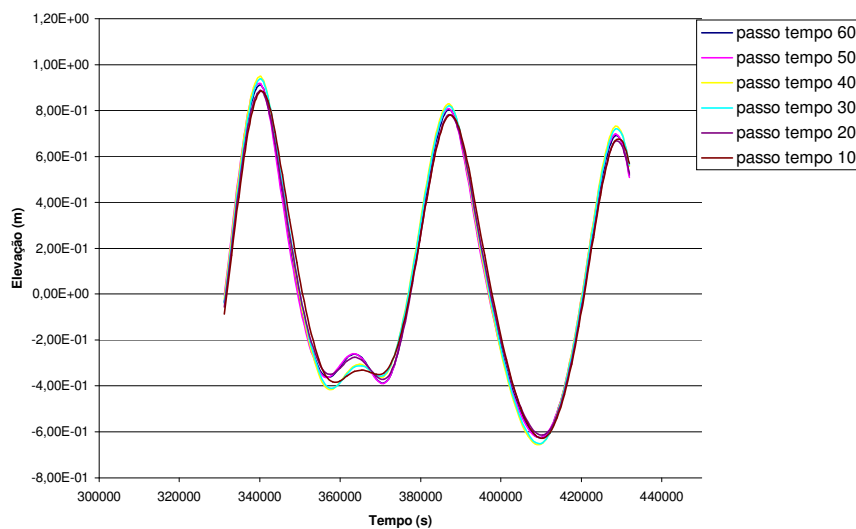


GRÁFICO 6.2 - DETALHE DA SÉRIE TEMPORAL DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO

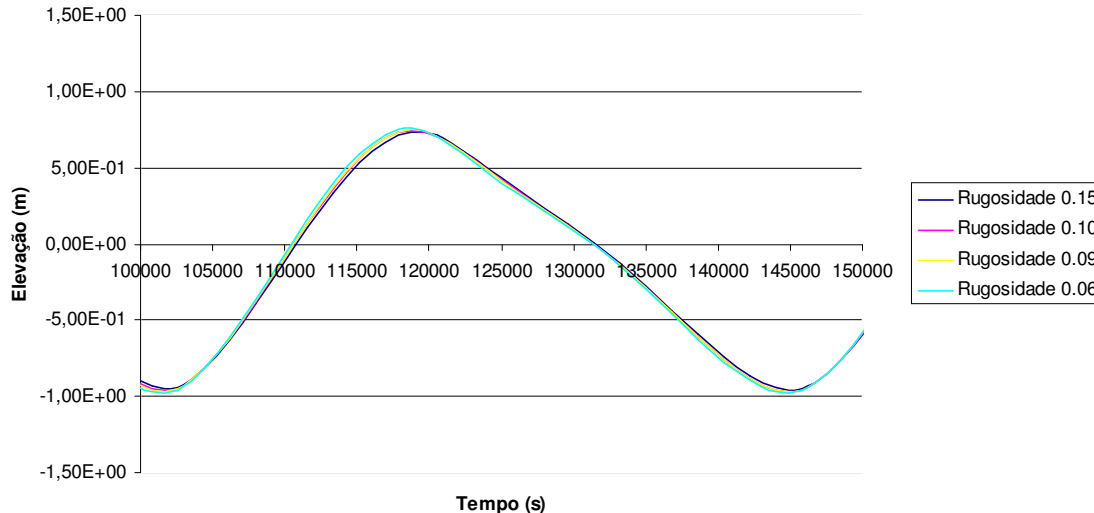


6.1.5.3 Sensibilidade do modelo a mudanças nos parâmetros físicos.

6.1.5.3.1 Efeito da rugosidade do fundo

Foi pesquisado o efeito da rugosidade de fundo no modelo em função da rugosidade equivalente ε . Para isto se realizaram simulações do modelo utilizando valores de rugosidade equivalente de 0,06; 0,09; 0,10; 0,15, constantes no tempo e espaço. Nos resultados obtidos a diferentes pontos de monitoramento verificou-se uma clara dependência entre o valor da rugosidade de fundo e os resultados dos níveis calculados pelo modelo. No nó 625 obteve-se os níveis apresentados no Gráfico 6.3 para os quatro diferentes valores de rugosidade, aqui se pode observar a perda de energia devido a variação da rugosidade.

GRÁFICO 6.3 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES RUGOSIDADES

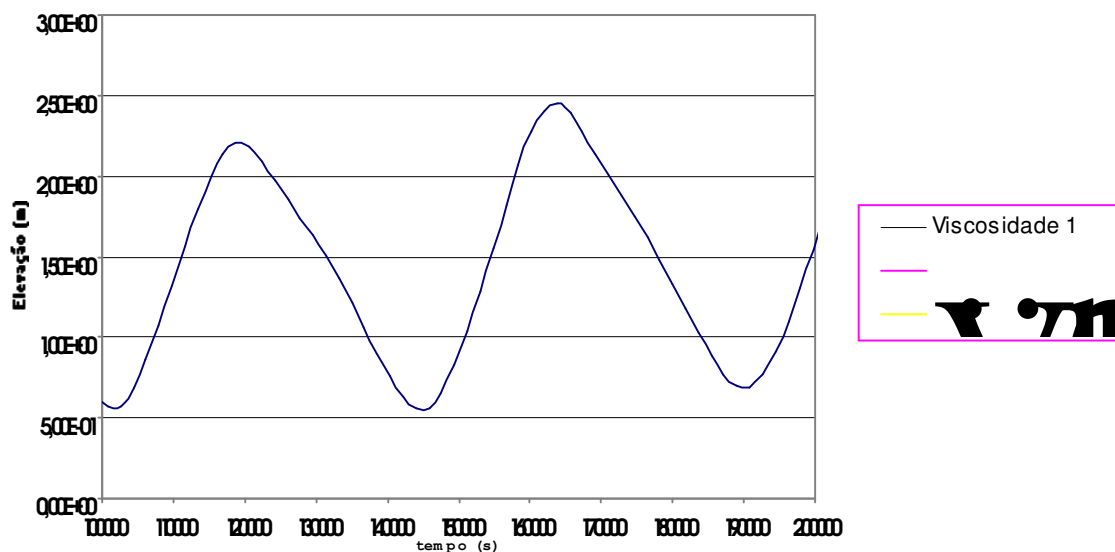


No Gráfico 6.3 como era de se esperar podemos observar que os maiores níveis e os menores níveis são dados no caso onde a rugosidade é menor, isto acontece devido a que um coeficiente de rugosidade menor propicia uma perda menor de energia.

6.1.5.3.2 Efeito da viscosidade turbulenta

No SisBAHIA o coeficiente de viscosidade turbulenta não é constante ele é calculado dinamicamente em função da resolução horizontal da grade (Δx , Δy) e em função dos gradientes de velocidades. Para poder aumentar ou diminuir o efeito difusivo deste termo é feito o produto de uma escala (esc) na função da viscosidade turbulenta $\nu = (esc)f\left(\Delta x, \Delta y, \frac{du}{dx}, \frac{dv}{dy}\right)$. Foram feitos estudos de sensibilidade para escalares de 0,25; 1; 2.

GRÁFICO 6.4 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES VISCOSIDADES

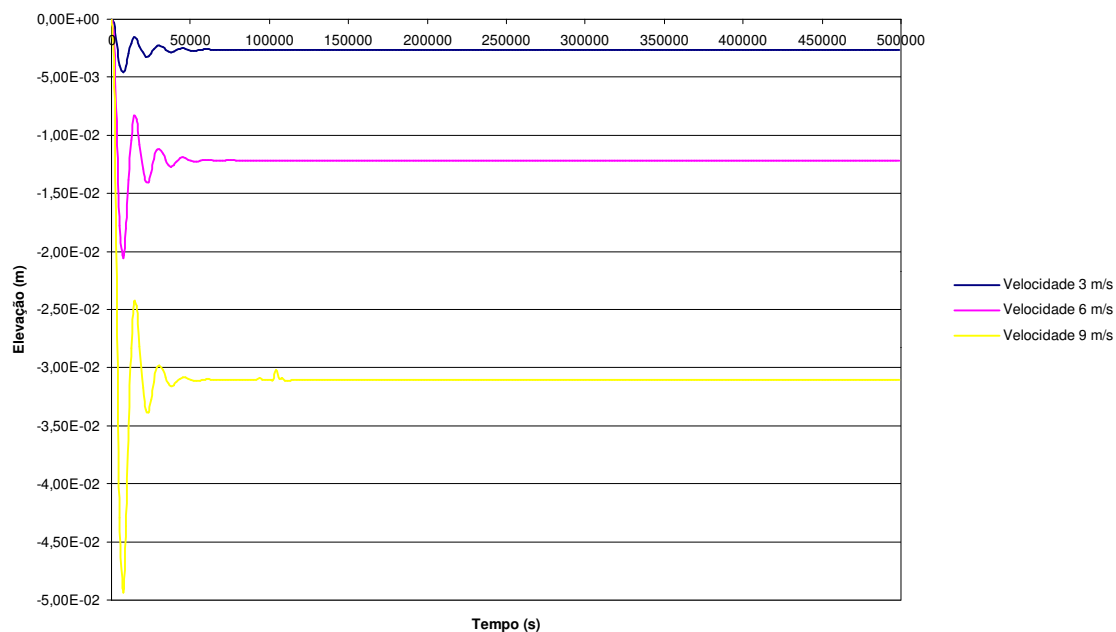


Como pode ser observado no Gráfico 6.4 o modelo não responde a variações de escalar de viscosidade nos níveis de elevação pois este parâmetro não influencia significativamente.

6.1.5.3.3 Efeito Do Vento Local

Pesquisou-se o efeito do vento local nos níveis de água e nas velocidades. Foram realizadas simulações considerando os seguintes campos de vento (constantes no tempo e no espaço): a) campo de vento de 3 m/s do SE; b) campo de vento de 6m/s do SE e c) campo de vento de 9 m/s SE. Em todos os casos considerou-se constante o valor do vento desde o princípio até o final da simulação.

GRÁFICO 6.5 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE VENTO



Como é possível observar no Gráfico 6.5, existe influência na elevação da superfície do mar, observando-se um declínio no nível em magnitude de 3,5 cm para o vento de 9 m/s, 1,22 cm para o vento de 6 m/s e 0,26 cm para o vento de 3 m/s. Observa-se que não existe uma relação linear entre o declínio do nível do mar e a velocidade do vento.

6.1.5.4 Conclusão

Neste estudo de sensibilidade foram identificados os principais parâmetros

do modelo aplicado à baía de Antonina-Paranaguá. Com base nisto se considerou oportuno utilizar os seguintes valores dos parâmetros para estudos posteriores: a) A malha com espaçamento entre 60m-180m; b) Intervalo de calculo $t = 40$ segundos; c) escalar de viscosidade turbulenta igual a 1; d) Rugosidade de fundo equivalente para a região de 0,10. A rugosidade de fundo equivalente considerada de acordo com ABBOT e BASCO (1994) é para terreno ou leito de terra com transporte de sedimento, o qual esta é compatível com o observado por SOARES et al (1997) para a região.

6.2 CALIBRAÇÃO

O objetivo da calibração do modelo é reproduzir o movimento do fluido para a situação conhecida mediante a variação dos parâmetros físicos dentro de valores fisicamente adequados. A batimetria, a topografia, e as condições de fronteira são conhecidas com um certo nível de precisão e devem de ser ajustados na calibragem do modelo (VERBOOM et al., 1992); (GERRITSEN et al., 1995).

A metodologia mais utilizada para calibrar um modelo computacional é a metodologia de teste e erro (PALACIO, 2002).

De acordo com ROSMAN (2001) os seguintes pontos conceituais definem uma metodologia adequada para o processo de calibração de um sistema de modelos de hidrodinâmica. Segue uma ordem sequencial de importância e pré requisitos:

O primeiro e mais fundamental passo de calibração é verificar se as escalas características dos fenômenos de interesse e as escalas de discretização do modelo são compatíveis.

O segundo é verificar exaustivamente se a geometria do domínio de interesse está adequadamente representada. Neste sentido, as principais ocorrências são: discretização inadequadas, sempre muito grosseiras para capturar feições geométricas que possam afetar os dados medidos e os resultados do modelo. E, valores impróprios de profundidade especialmente ao longo dos contornos, ao longo de nós de ilhas e de

canais estreitos.

O terceiro e igualmente fundamental passo no processo de calibração, refere-se às condições de contorno. Uma verificação abrangente deve ser feita, porque os modelos hidrodinâmico são muito sensíveis a mudanças nas condições de contorno. Nesse sentido, como mostrado no primeiro passo, deve-se dar atenção especial às escalas características dos dados de entrada.

O quarto passo fundamental de calibração, foca nas variações dos níveis de água ou no caso de corpos de água costeiros, níveis de maré. Se um modelo está simulando corretamente as variações do nível de água, então volumes de água estão sendo corretamente trocados dentro do domínio do modelo, ao menos de maneira global.

O quinto passo da calibração refere-se aos valores de velocidade das correntes. Uma vez que os quatro passos anteriores foram checados positivamente, as correções necessárias para calibrar o campo de velocidades devem ser obtidas através de ajustes nos parâmetros de turbulência do modelo hidrodinâmico. Caso não se obtenha o ajuste desejado, é provável que algum dos passos anteriores precise de análise adicionais, especialmente o segundo.

Vale enfatizar: pequenas diferenças em batimétrica podem interferir muito significativamente em valores locais de velocidade. Deve-se especialmente verificar se as profundidades usadas no modelo condizem com as medidas por ocasião das medições de velocidade ROSMAN (2001).

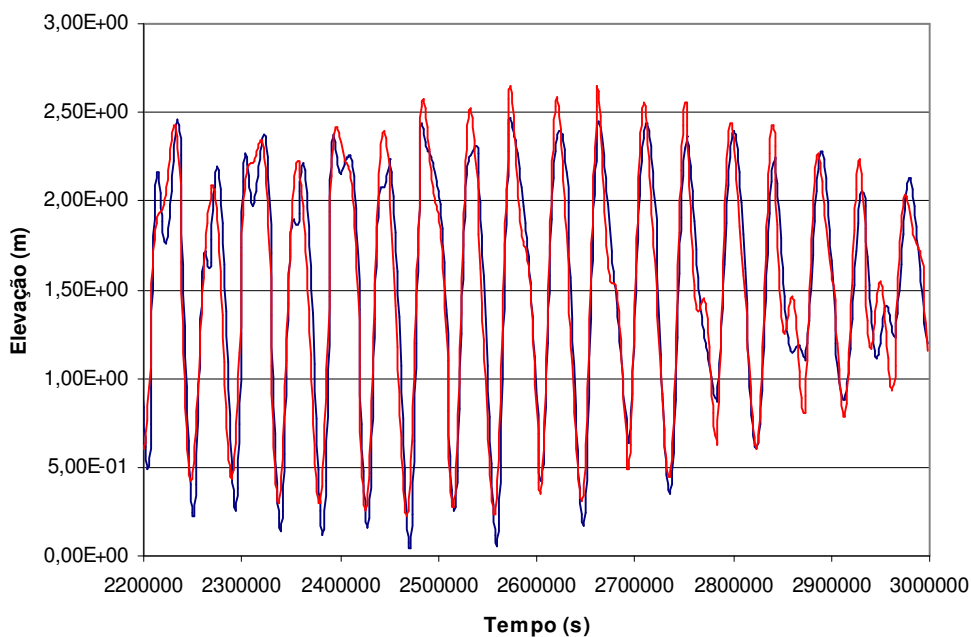
Em nosso caso, não dispomos da batimétrica da região com a suficiente frequência para realizar uma calibragem adequada. Também não existem mareógrafos na quantidade e localização adequada para obter dados de campo suficientes para estabelecer uma fronteira aberta acertada ou obter dados de aferição que nos permitam realizar uma calibragem válida. Segundo MARONE (2003) a falta de dados primários para ser trabalhados em modelos é uma realidade para a maior parte das águas costeiras do país. Portanto nos limitaremos a introduzir os dados disponíveis para a região sem objetivar a realização de uma calibragem de grande exatidão devido à falta

de dados aptos para isto. Obtendo de forma muito simplificada uma região com características próximas à realidade de acordo aos dados disponíveis para uso em simulação de derrame de hidrocarboneto.

O modelo foi forçado no contorno aberto com as elevações da superfície do mar geradas pelas constantes harmônicas correspondente ao Porto de Paranaguá e aferido com as elevações da superfície do mar geradas pelas constantes harmônicas correspondentes ao porto de Antonina.

A calibração realizada atingiu um coeficiente de ajuste (ou erro percentual), de 20% , e uma média quadrática (ou raiz média quadrática) de 0,23 metros ambos em relação às elevações. Pode ser observada a comparação dos dados modelados e os dados medidos para o porto de Antonina no Gráfico 6.6. A rugosidade equivalente adotada para atingir esta precisão foi de 0,05 m a qual encontra-se dentro do intervalo de material de fundo predominante na região.

GRÁFICO 6.6 - SÉRIE TEMPORAL DE ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR MEDIDO E MODELADO PARA A ESTAÇÃO DE ANTONINA.



7 SIMULAÇÕES DE HIDRODINÂMICA E DERRAME DE PETRÓLEO

Muitos são os possíveis cenários provenientes da combinação da gama de padrões de circulação e pontos de derrames de óleo na região de estudo. Idealmente é necessário realizar levantamento de dutos, tanques, barcos tanque, pontos de carga e descarga, plataformas petroleiras e outras fontes potenciais de derramamento, com as suas respectivas localizações, vazões, volumes de operação, tipos de óleos e prováveis regime de derramamento para mediante estes dados poder estabelecer hipóteses acidentais e descarga de pior caso no que diz respeito ao derrame. A resolução No. 293 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, dispõe o conteúdo mínimo no Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo originados em portos organizados, instalações portuárias ou terminais, dutos, plataformas bem como suas respectivas instalações de apoio, e orienta a sua elaboração. Na secção 2.2.1 do anexo II apresenta-se os critérios mínimos a ser considerados para estabelecer o volume da descarga do pior caso de acordo com a fonte.

Tendo em vista a não existência de uma base de dados das potenciais fontes de poluição na região para avaliar e estabelecer tanto a localização quanto o volume e características do óleo a ser considerados como pior caso, será considerado como volume de descarga de pior caso o volume de 200 m^3 , considerada como descarga média de acordo a resolução No. 293 do CONAMA na secção 2.2 do Anexo III.

Este volume de descarga será estudado em três cenários. No primeiro caso consideraremos a região de estudo forçada unicamente pelas elevações da superfície do mar geradas pelas constantes harmônicas correspondente ao porto de Paranaguá e o derrame de óleo nas coordenadas UTM $x=743461,7600$, $y=7179224,1000$ no nó 1050, aproximadamente a 9,9 km ao Oeste do Porto de Paranaguá, de forma contínua durante 20 minutos, resultando em um volume total de 200 m^3 .

No segundo caso se introduziram os rios de Nhundiaquara e Cachoeira com valores de vazão obtidos das campanhas realizadas por MANTOVANELLI (1999), sendo estes valores de $34,95 \text{ m}^3/\text{s}$ e $46,85 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada respectivo rio representando

estes as máximas da campanha de verão.

No terceiro caso utilizaremos o cenário anterior introduzindo uma velocidade do vento de 6m/s SE já que esta velocidade encontra se entre 4 m/s e 6 m/s correspondente a 62,9% das ocorrências e a direção elegida encontra se entre o E e SE que representa 41,3% do total registrado, dados estes estudados por SOARES (1990). O vento será introduzido de forma homogênea e constante tanto no tempo quanto no espaço.

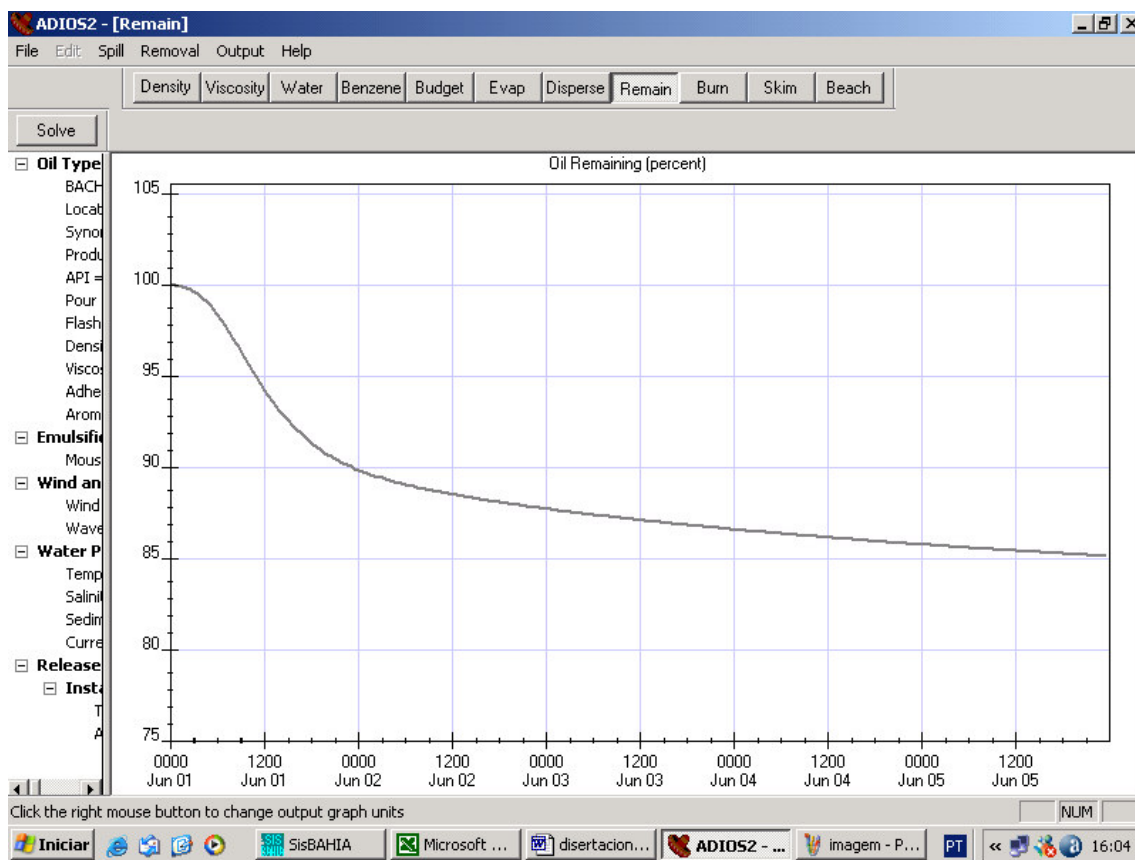
7.1 CENÁRIO 1

Neste cenário o campo de correntes é gerado tendo como forçantes a maré. A onda de maré é criada através das constantes na Tabela 5.2. Posteriormente é introduzido no modelo o hidrocarboneto com a sua respectiva curva de balanço de massa obtida pelo ADIOS2, a região é modelada para o transporte do hidrocarboneto por 5 dias, se descreve a pluma em intervalos de 10 horas até o tempo de 50 horas após o derramamento do óleo.

7.1.1 Balanço de Massa do Hidrocarboneto

O volume a ser considerado como derrame é de 200 m³, sendo o hidrocarboneto Bachaquero 17 da EXXON com características de API=16.1, Pour Point= -18°C, Densidade de 0,963 g/cc a 20° C, viscosidade de 1079cst a 20°C e as referências do meio em que ocorre sem vento, temperatura média no corpo dá água de 20°C, salinidade de 15 ppt, sedimento suspenso de 50 g/m³. Com estas características de cenário foi calculado a curva de balanço de massa no modelo ADIOS2 para ser introduzido posteriormente no modelo SisBAHIA. Os resultados obtidos do modelo podem ser apreciados no Gráfico 6.6.

GRÁFICO 6.7 - CURVA DE DECAIMENTO DO PETRÓLEO BACHAQUERO 17 PARA 5 DIAS



O modelo de decaimento apresenta que o volume remanescente em questão após de 5 dias é 85% do total, isto é 170 m^3 .

7.1.2 Transporte Lagrangeano Advectivo Difusivo

Para obter o transporte lagrangeano advectivo difusivo do hidrocarboneto em estudo, calcula-se primeiro o campo de velocidades para a região em estudo considerando velocidade de vento nulo, rugosidade de fundo de 0,05m homogêneo em toda a região, constante de viscosidade 2, passo de tempo de 40 segundos, com 5 níveis de discretização vertical para poder utilizar unicamente a superfície devido a que o transporte de óleo ocorre principalmente na superfície.

Os níveis foram monitorados no nó 625 de coordenadas UTM $x=751019,80$

$y = 7179887,11$, a uma distância aproximada de 15,7 km ao oeste do Porto de Paranaguá. Foi gerada uma serie temporal de nível no nó 625, para um período de 30 dias em intervalos de 0,5 horas, como mostra o Gráfico 6.8. Como pode ser observado, as maiores amplitudes durante o período sizígia, foram aproximadamente de um metro. O que se encontra em perfeita conformidade com as observações.

O intervalo de variação de níveis na regia de estudo encontra se dentro do esperado para a região em estudo, não existindo padrão irreal de níveis na região.

GRÁFICO 6.8 - ELEVAÇÕES DA SUPERFÍCIE NO NÓ 625

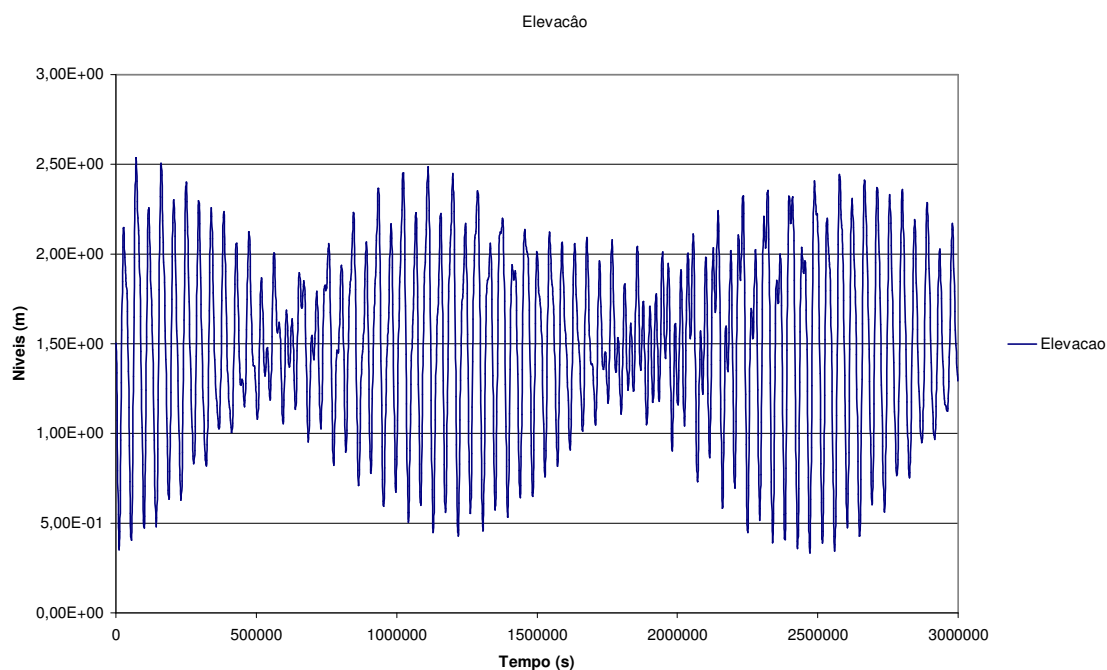
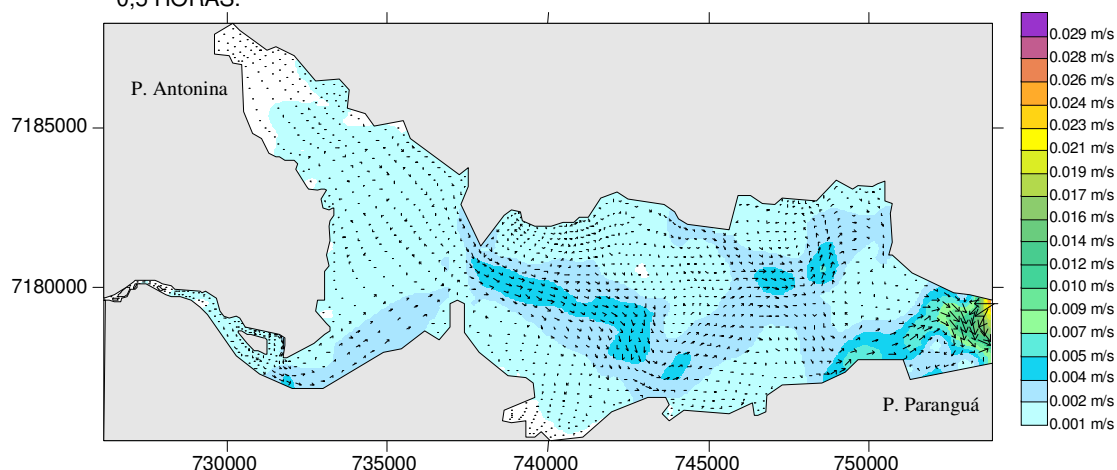


FIGURA 6.4 - CAMPO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA SUPERFÍCIE OBTIDA COM BASE NO COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES PARA UM PERÍODO DE 30 DIAS EM INTERVALOS DE 0,5 HORAS.

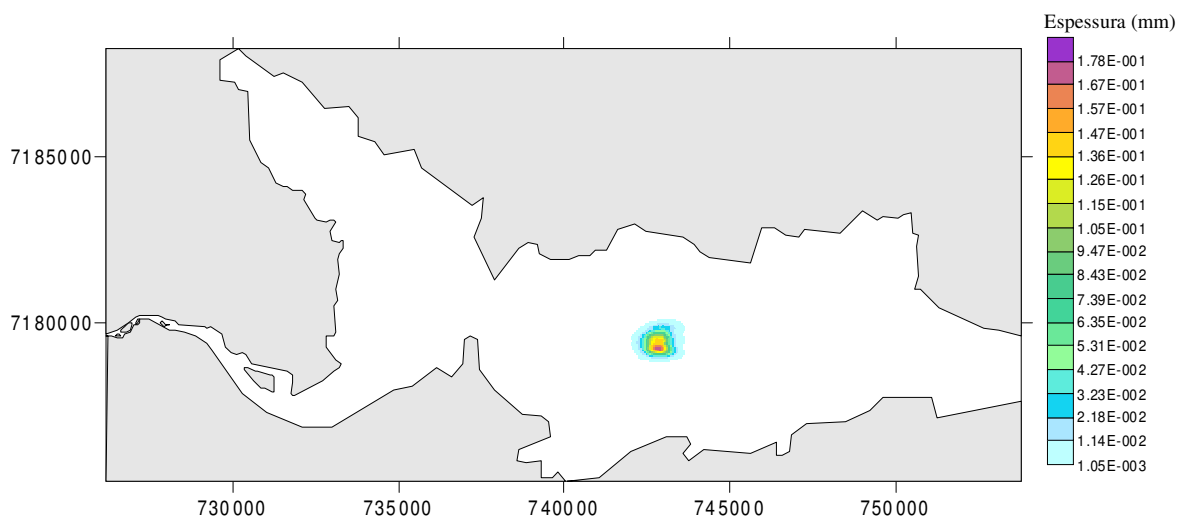


A Figura 6.4 apresenta as velocidades residuais para a região no intervalo de tempo de 30 dias.

Procedendo para a introdução do poluente na região obtemos o movimento da pluma em intervalos de 10 horas como mostra se nas figuras a continuação, até uma concentração mínima de $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

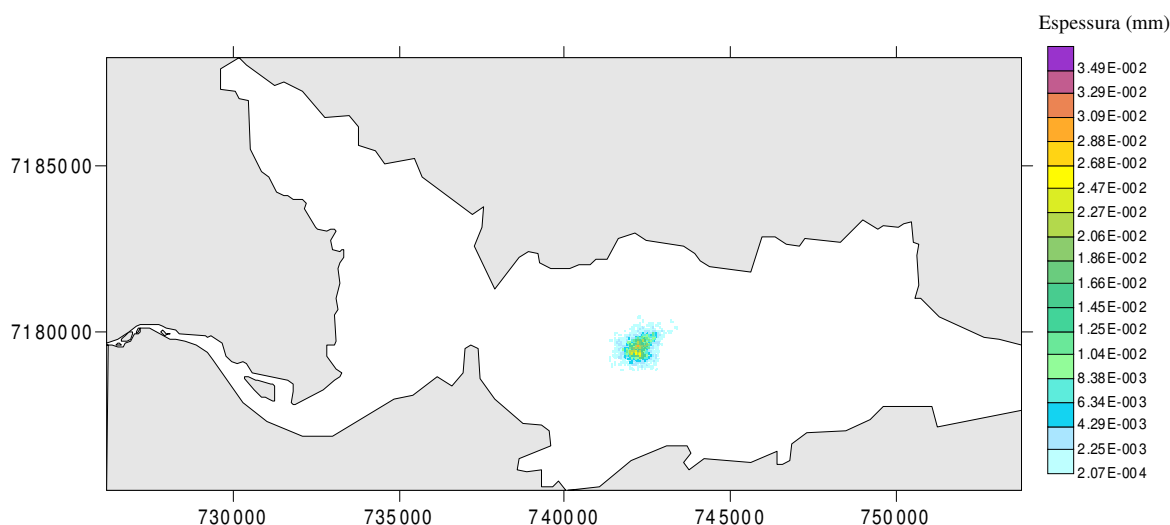
Após 10 horas de modelagem do derramamento tem-se uma espessura da pluma que varia de 0,178 mm a 0,001 mm, como apreciado na Figura 6.5. Atingindo uma área aproximadamente de $1,4 \text{ km}^2$, e com o centro da pluma na coordenada UTM $x= 742885,29$ $y= 7179293,50$, a uma distância de 580 metros ao oeste do lugar do derrame.

FIGURA 6.5 - 10 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



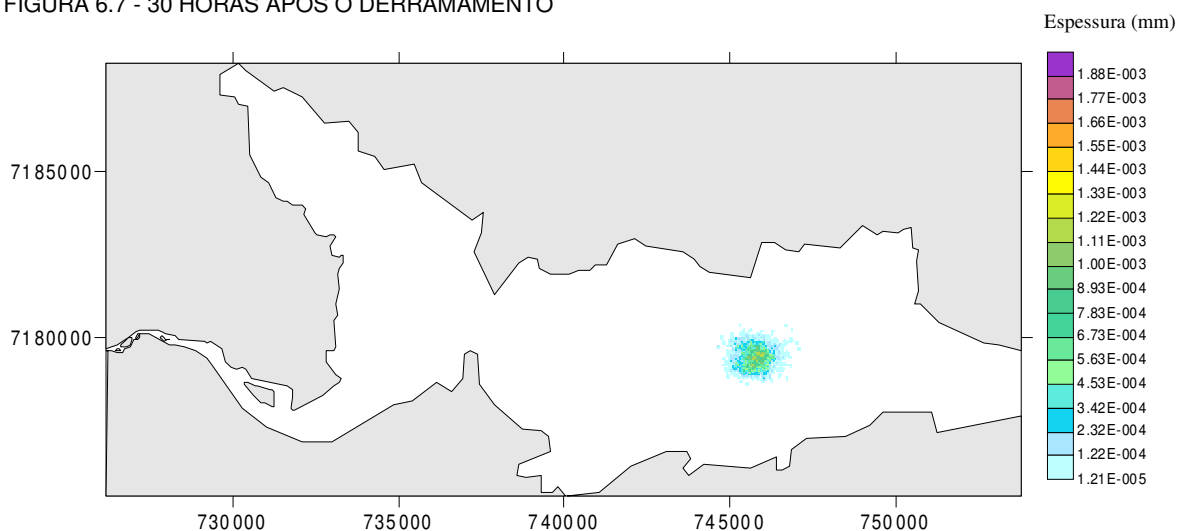
Após de 20 horas do derramamento a espessura da pluma varia de 0,035 mm a 0,000207 mm, como apreciado na Figura 6.6, atingindo uma área de 1,9 km² e com o centro da pluma na coordenada UTM x=742267,56 y=7179524,10 a uma distância de 1250 metros ao Nordeste do lugar do derrame. Observa-se fragmentação da pluma.

FIGURA 6.6 - 20 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



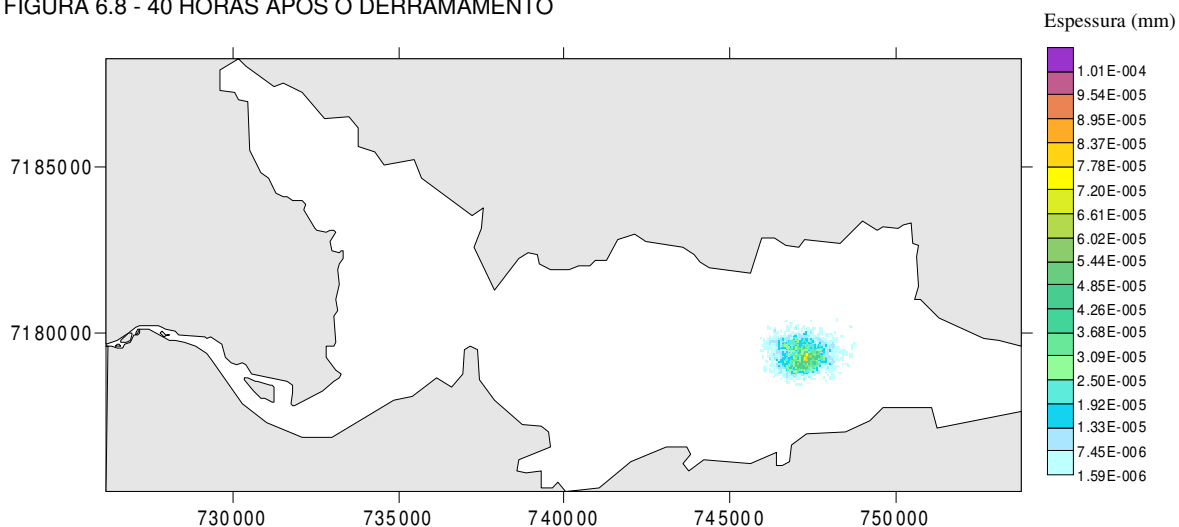
Após 30 horas do derramamento a espessura da pluma varia de $1,55 \cdot 10^{-3}$ mm a $1,21 \cdot 10^{-5}$ mm, como apreciado na Figura 6.7, atingindo uma área de 2 km² e com o centro da pluma na coordenada UTM x=745654,80 e y=7179263,80 a uma distância de 2174 metros a Leste (E) do lugar do derrame. A fragmentação da pluma continua a acentuar-se.

FIGURA 6.7 - 30 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 40 horas do derramamento a espessura da pluma varia de $8,95 \cdot 10^{-5}$ mm a $1,59 \cdot 10^{-6}$ mm, como apreciado na Figura 6.8, atingindo uma área de $2,9 \text{ km}^2$ e com o centro da pluma na coordenada UTM $x = 745625,43$ e $y = 7179523,55$ a uma distância de 2184 metros a Nordeste (NE) do lugar do derrame. A fragmentação da pluma continua a acentuar-se.

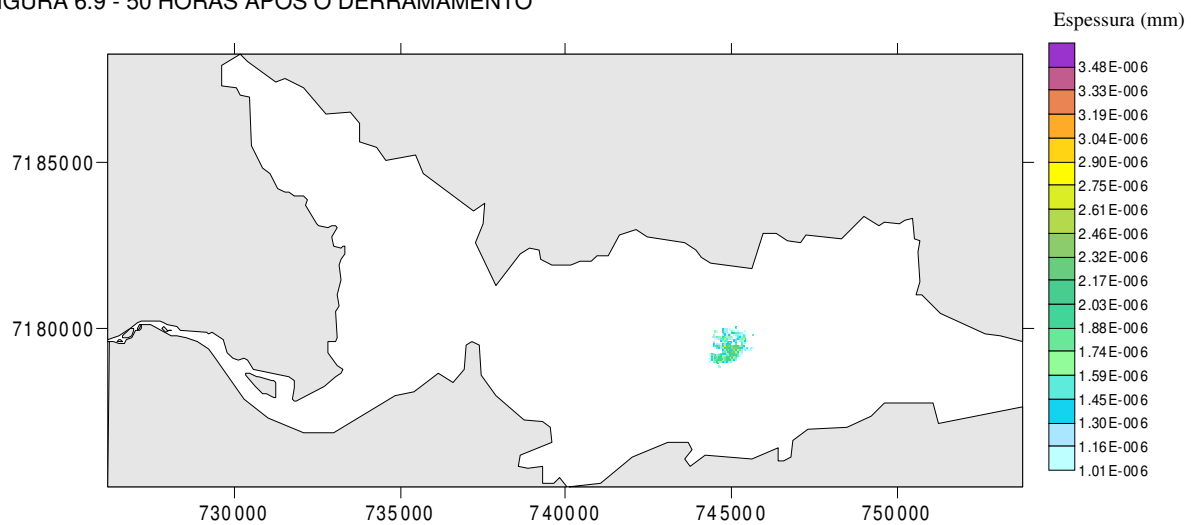
FIGURA 6.8 - 40 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 50 horas do derramamento a espessura da pluma varia de $2,90 \cdot 10^{-6}$ mm a $1,01 \cdot 10^{-6}$ mm, como apreciado na Figura 6.9, atingindo uma área de $1,18 \text{ km}^2$ e com o centro da pluma na coordenada UTM $x = 745110,86$ e $y = 7179302,10$ a uma distância de 1656 metros ao Leste do lugar do derrame. É possível observar a redução da área

da nuvem em virtude da redução da espessura da pluma a quantias menores que $1,01 \times 10^{-6}$ mm, a tendência da pluma de óleo é de diminuir de dimensão devido ao processo de transporte ao que se encontra submetido.

FIGURA 6.9 - 50 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



7.2 CENÁRIO 2

Neste cenário primeiramente é calculado o campo de velocidades da região de estudo, tendo como forçantes as constantes harmônicas e vazões dos rios Nhundiaquara e Cachoeira com vazões de $34,95 \text{ m}^3/\text{s}$ e $46,85 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. O hidrocarboneto utilizado assim como o volume são os mesmos utilizados no primeiro cenário.

7.2.1 Transporte Lagrangeano Advectivo Difusivo

Para obter o transporte lagrangeano advectivo difusivo do hidrocarboneto em estudo, calcula se primeiro o campo de velocidades para a região em estudo considerando, rugosidade de fundo de $0,05\text{m}$ homogêneo em toda a região, constante de viscosidade 2, passo de tempo de 40 segundos , com 5 níveis de discretização vertical.

Os níveis foram monitorados no nó 625 de coordenadas UTM $x= 751019,80$ $y= 7179887,11$, a uma distância aproximada de 15,7 km ao oeste do Porto de Paranaguá. Foi gerada uma série temporal de nível no nó 625, para um período de 30 dias em intervalos de 0,5 horas, como mostra o Gráfico 6.9.

GRÁFICO 6.9 - ELEVAÇÕES DA SUPERFÍCIE NO NÓ 625

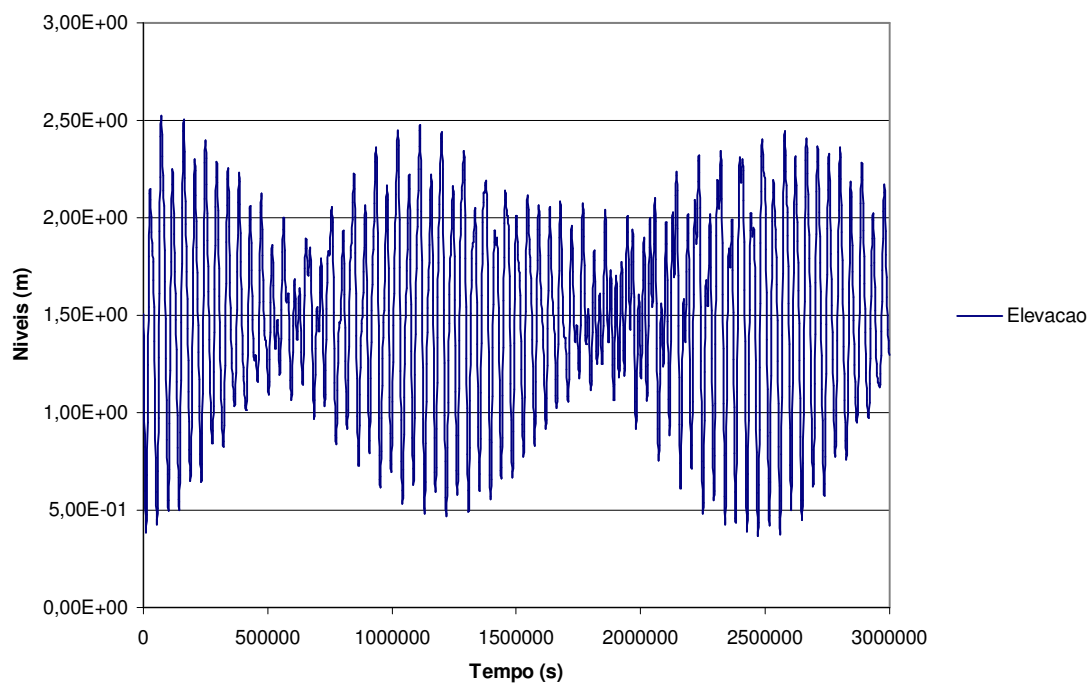
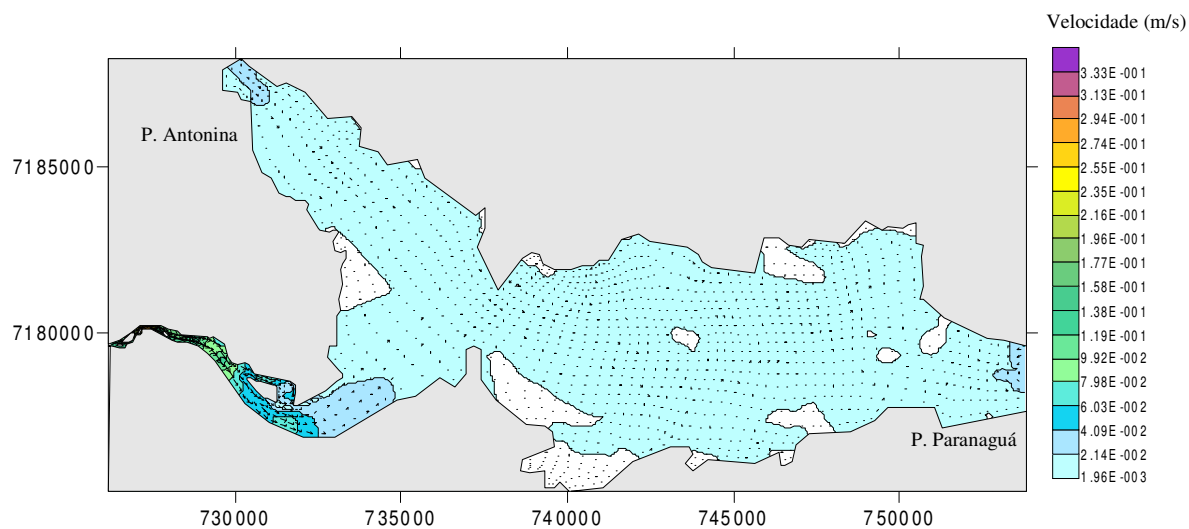


FIGURA 6.10 - CAMPO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA SUPERFÍCIE OBTIDA COM BASE NO COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES PARA UM PERÍODO DE 30 DIAS EM INTERVALOS DE 0,5 HORAS

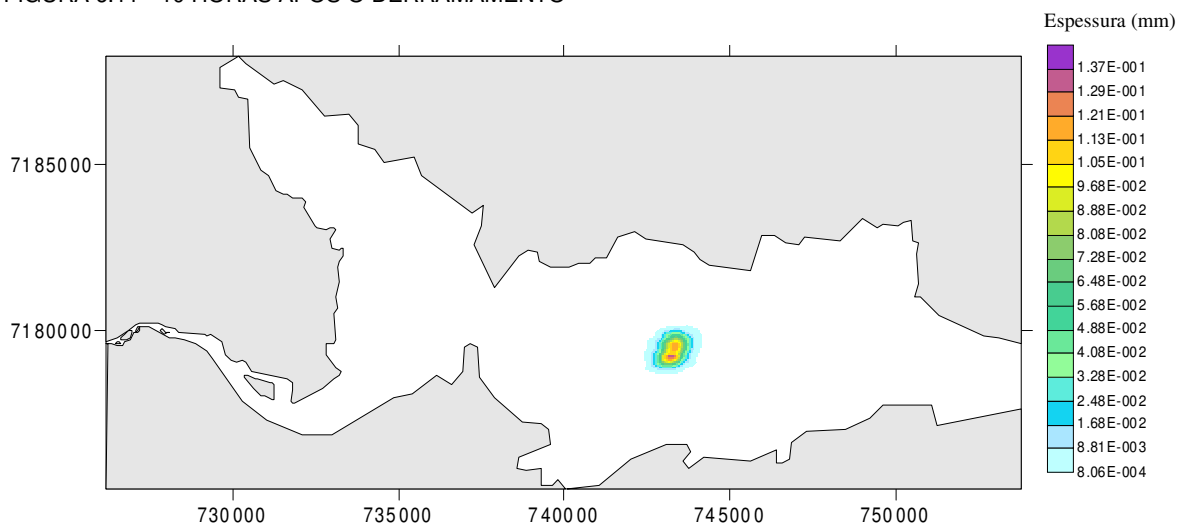


A Figura 6.10 apresenta as velocidades residuais para a região no intervalo de tempo de 30 dias.

Procedendo a introdução do poluente na região obtemos o movimento da pluma em intervalos de 10 horas como mostra se nas Figuras a continuação, até uma concentração mínima de $1,0 \cdot 10^{-6}$ m.

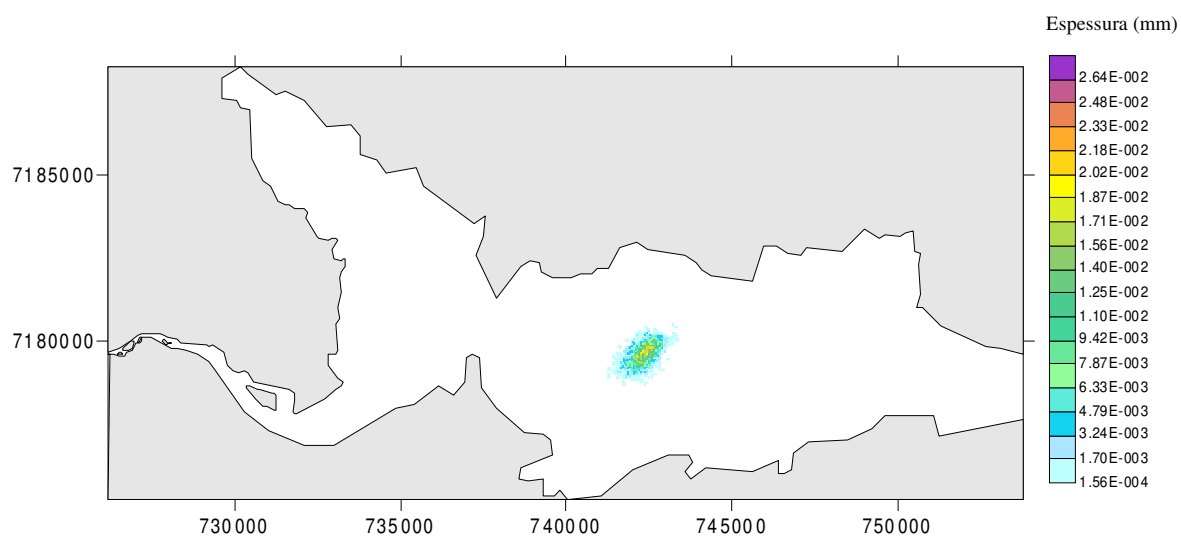
Após 10 horas de modelagem do derramamento tem-se uma espessura da pluma que varia de 0,137 mm a 0,0008 mm, como apreciado na Figura 6.11. Atingindo uma área aproximadamente de $1,4 \text{ km}^2$, e com o centro da pluma na coordenada UTM $x = 743173,53$ $y = 717958,80$ a uma distância de 280 metros ao oeste do lugar do derramamento.

FIGURA 6.11 - 10 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



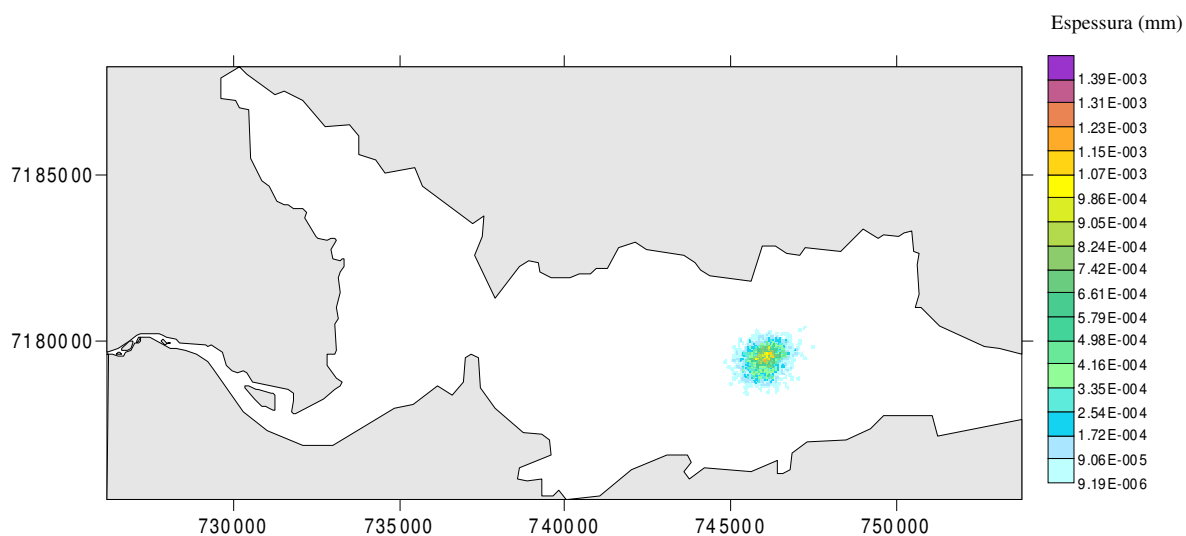
Após 20 horas de modelagem do derramamento tem-se uma espessura da pluma que varia de $2,48 \cdot 10^{-2}$ mm a $1,568 \cdot 10^{-4}$ mm, como apreciado na Figura 6.12. Atingindo uma área aproximadamente de $1,8 \text{ km}^2$, e com o centro da pluma na coordenada UTM $x = 742429,98$ $y = 7179686,49$ a uma distância de 1145 metros ao oeste (O) do lugar do derrame. Observa se fragmentação da pluma.

FIGURA 6.12 - 20 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 30 horas do derramamento a espessura da pluma varia de $1,23 \times 10^{-3}$ mm a $9,19 \times 10^{-6}$ mm, como apreciado na Figura 6.13, atingindo uma área de 2 km^2 e com o centro da pluma na coordenada UTM $x = 746173,65$ e $y = 7179577,35$ a uma distância de 2738 metros a NE do lugar do derrame. A fragmentação da pluma continua a acentuar-se.

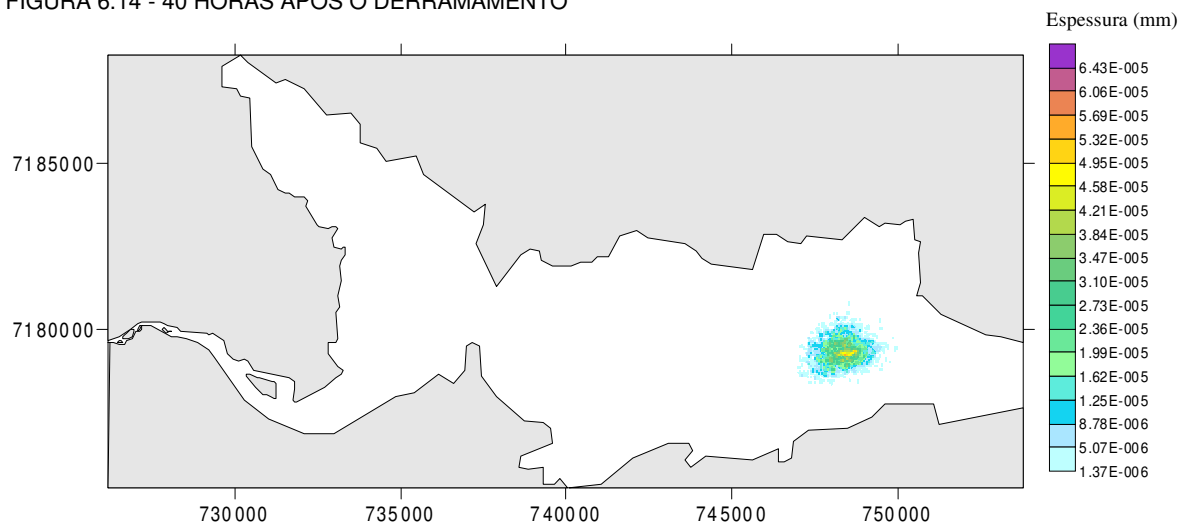
FIGURA 6.13 - 30 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 40 horas do derramamento a espessura da pluma varia de $6,06 \times 10^{-5}$ mm a 1.37×10^{-6} mm, como apreciado na Figura 6.14, atingindo uma área de 3 km^2 e com o

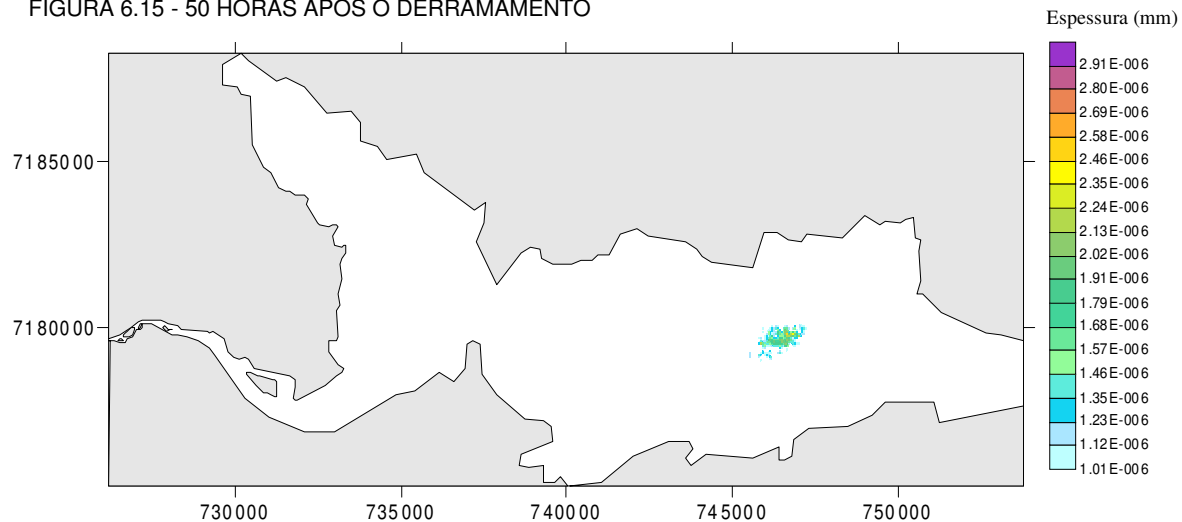
centro da pluma na coordenada UTM $x=748434,86$ e $y=7179320,10$ a uma distância de 4986 metros a E do lugar do derrame. A fragmentação da pluma continua a acentuar-se.

FIGURA 6.14 - 40 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 50 horas do derramamento a espessura da pluma varia de $2,80 \times 10^{-6}$ mm a $1,0 \times 10^{-6}$ mm, como apreciado na Figura 6.15, atingindo uma área de $1,37 \text{ km}^2$ e com o centro da pluma na coordenada UTM $x=746441,04$ e $y=7179559,50$ a uma distância de 3000 metros a NE do lugar do derrame. A fragmentação da pluma continua a acentuar-se.

FIGURA 6.15 - 50 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



7.3 CENÁRIO 3

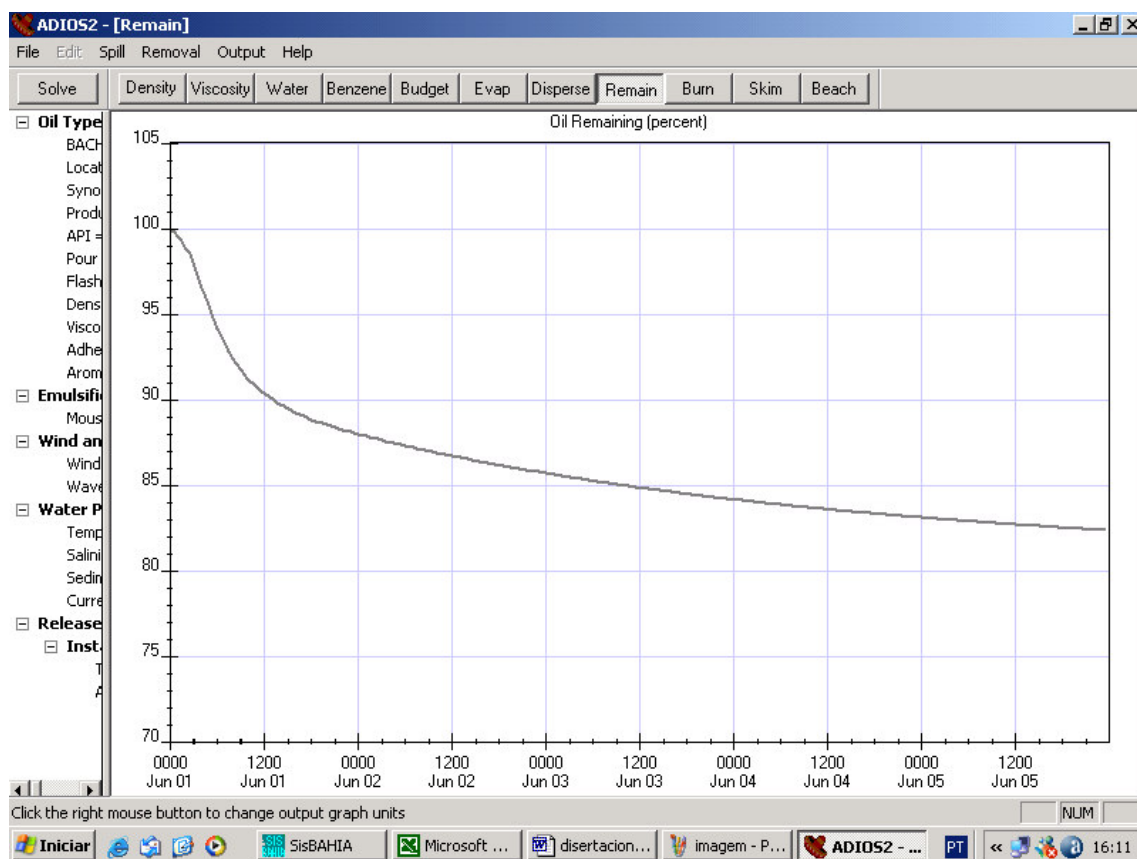
Neste cenário primeiramente é calculado o campo de velocidades da região de estudo, tendo como forçantes as constantes harmônicas o vento em direção Sudeste (SE) com intensidade de 6 m/s e os rios Nhundiaquara e Cachoeira com vazões de 34,95 m³/s e 46,85 m³/s . O hidrocarboneto a ser utilizado será o mesmo dos cenários anteriores no que diz respeito ao volume e características do óleo porém o decaimento será calculado novamente pelo ADIOS2 para o intervalo de cinco dias, devido a influência do vento influencia neste processo.

7.3.1 Balanço de Massa do Hidrocarboneto

O volume a ser considerado como derrame é de 200 m³, sendo o hidrocarboneto Bachaquero 17 da EXXON com características de API=16.1, Pour Point= -18°C, Densidade de 0,963 g/cc a 20° C, viscosidade de 1079cst a 20° C e as referências do meio em que ocorre é com vento de 6 m/s na direção SE, temperatura média no corpo dá água de 20° C, salinidade de 15 ppt, sedimento suspenso de 50 g/m³. Com estas características de cenário foi calculado a curva de balanço de massa no modelo ADIOS2 para ser introduzido posteriormente no modelo SisBAHIA. Os resultados obtidos do modelo pode ser apreciado no Gráfico 6.10.

O modelo de decaimento apresenta que o volume remanescente em questão após de 5 dias é 81% do total, isto é 162 m³.

GRÁFICO 6.10 - CURVA DE DECAIMENTO DO PETRÓLEO BACHAQUERO 17 PARA 5 DIAS



7.3.2 Transporte lagrangeano advectivo difusivo

Para obter o transporte lagrangeano advectivo difusivo do hidrocarboneto em estudo, calcula se primeiro o campo de velocidades para a região em estudo considerando velocidade 6 m/s na direção SE, rugosidade de fundo de 0,05m homogêneo em toda a região, constante de viscosidade 2, passo de tempo de 40 segundos , com 5 níveis de discretização vertical.

Os níveis foram monitorados no nó 625 de coordenadas UTM $x = 751019,80$ $y = 7179887,11$, a uma distância aproximada de 15,7 km ao oeste do Porto de Paranaguá. Foi gerada uma série temporal de nível no nó 625, para um período de 30 dias em intervalos de 0,5 horas, como mostra o Gráfico 6.11.

GRÁFICO 6.11 - ELEVÇÃO DA SUPERFÍCIE NO NÓ 625

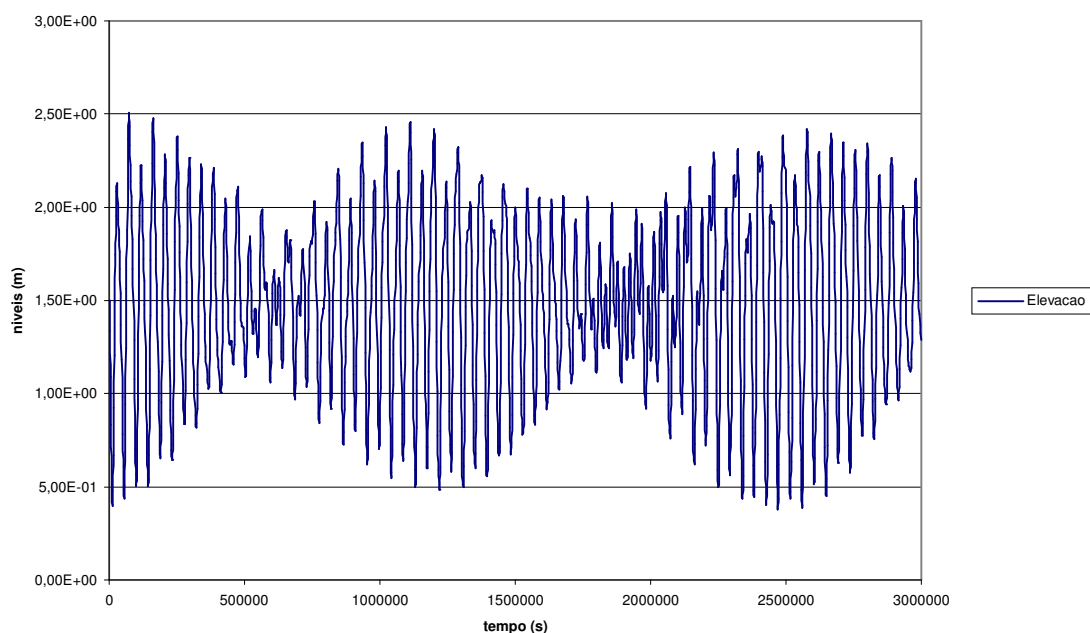
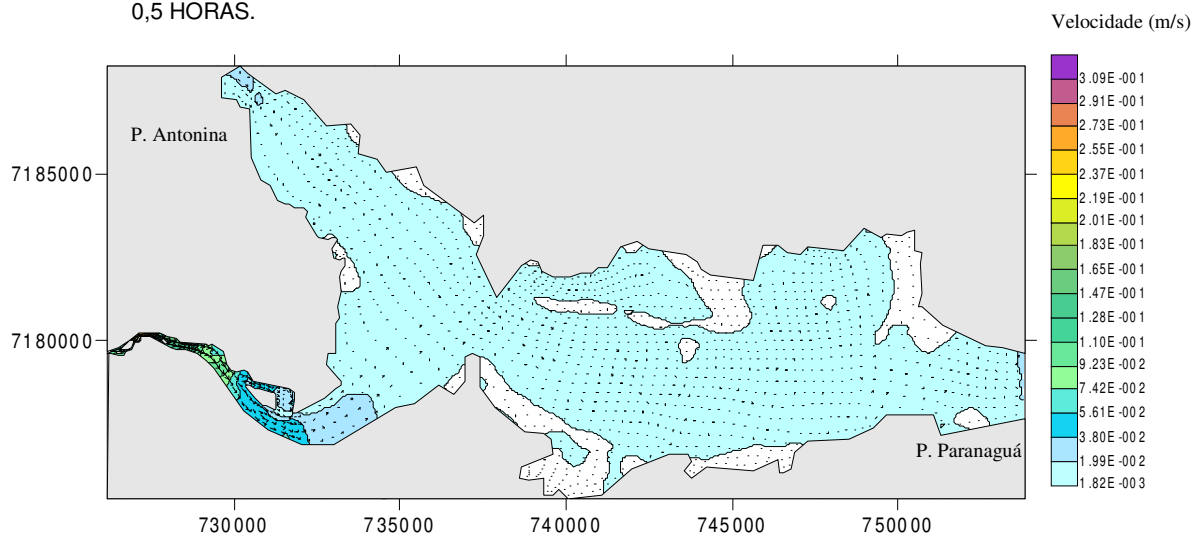


FIGURA 6.16 - CAMPO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA SUPERFÍCIE OBTIDA COM BASE NO COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES PARA UM PERÍODO DE 30 DIAS EM INTERVALOS DE 0,5 HORAS.

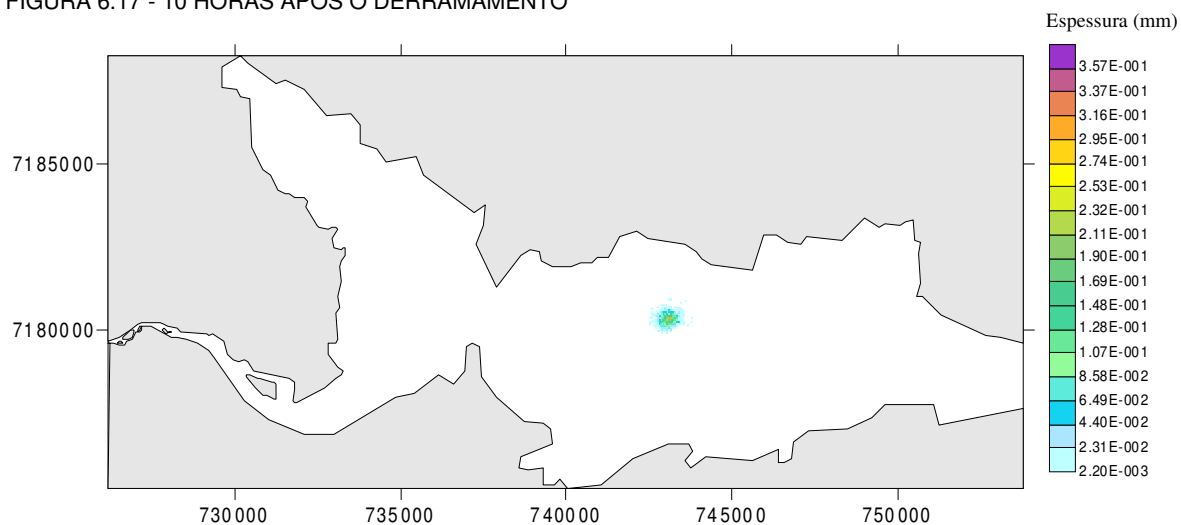


A Figura 6.17 apresenta as velocidades residuais para a região no intervalo de tempo de 30 dias.

Procedendo para a introdução do poluente na região obtemos o movimento da pluma em intervalos de 10 horas como mostra se nas figuras a continuação, até uma concentração mínima de $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

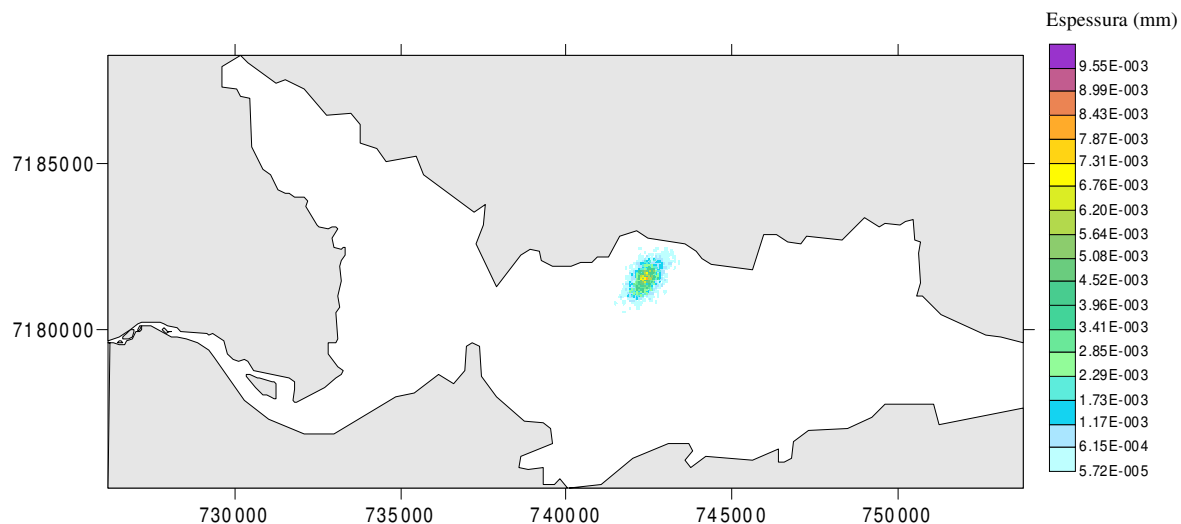
Após 10 horas de modelagem do derrame tem-se uma espessura da pluma que varia de 0,357 mm a 0,002 mm, como apreciado na Figura 6.17. Atingindo uma área aproximadamente de 1,11 km², e com o centro da pluma na coordenada UTM x= 743026,10 e y= 7180253,00 a uma distância de 1134 metros ao Norte-noroeste (NNO) do lugar do derrame. Observa-se fragmentação da pluma.

FIGURA 6.17 - 10 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



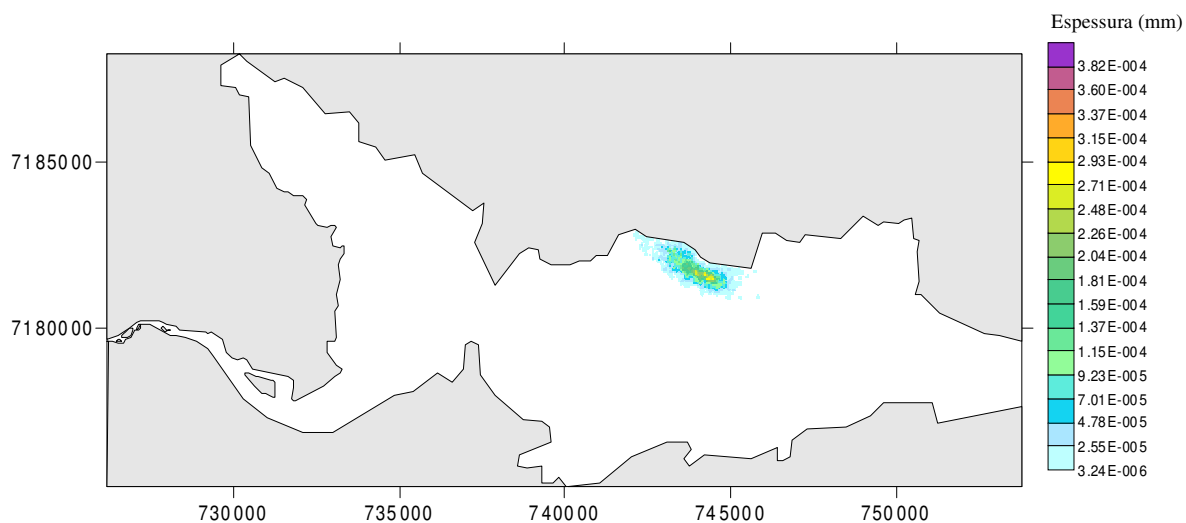
Após 20 horas de modelagem do derramamento tem-se uma espessura da pluma que varia de $9,55 \cdot 10^{-3}$ mm a $5,72 \cdot 10^{-5}$ mm, como apreciado na Figura 6.18. Atingindo uma área aproximadamente de 1,74 km², e com o centro da pluma na coordenada UTM x= 742374,10 y= 7181502,30 a uma distância de 2541 metros ao Norte-noroeste (NNO) do lugar do derrame. Observa-se desde aumento na fragmentação da pluma.

FIGURA 6.18 - 20 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 30 horas de modelagem do derrame tem-se uma espessura da pluma que varia de $3,82 \cdot 10^{-4}$ mm a $3,24 \cdot 10^{-6}$ mm, como apreciado na Figura 6.19. Atingindo uma área aproximadamente de $2,5 \text{ km}^2$, e com o centro da pluma na coordenada UTM $x= 743984,71$ $y= 7181723,50$ a uma distância de 2565 metros ao norte nordeste (NNE) do lugar do derrame. Observa-se que se acentua a fragmentação da pluma.

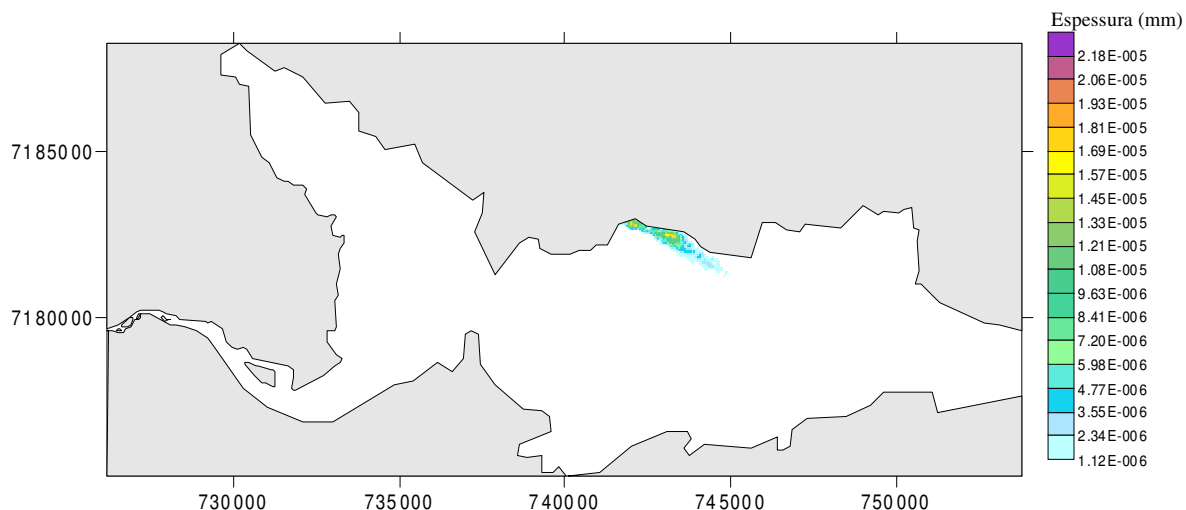
FIGURA 6.19 - 30 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 40 horas de modelagem do derrame tem-se uma espessura da pluma que varia de $1,12 \cdot 10^{-6}$ mm a $1,18 \cdot 10^{-5}$ mm, como apreciado na Figura 6.20. Atingindo

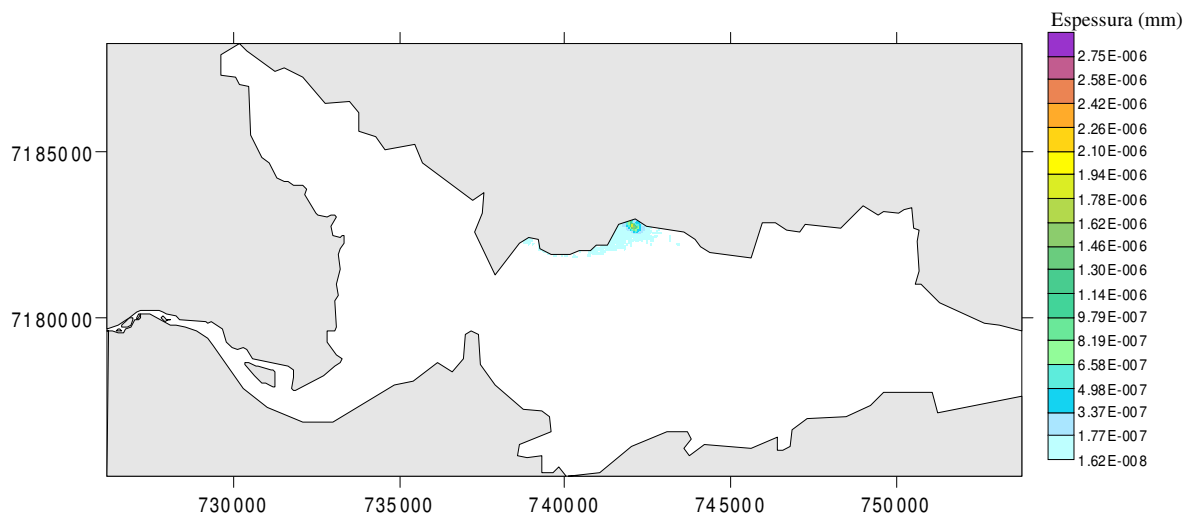
uma área aproximadamente de $1,87 \text{ km}^2$, e com o centro da pluma na coordenada UTM $x= 742858,59$ $y= 7182251,05$ a uma distância de 3104 metros ao Norte do lugar do derrame. Observa-se que se acentua a fragmentação da pluma.

FIGURA 6.20 - 40 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



Após 50 horas de modelagem do derramamento não existem áreas significativas com espessura maior a $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$. Para uma espessura mínima de $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ mm}$ tem-se uma variação da pluma que vai de $1,62 \cdot 10^{-8} \text{ mm}$ a $2,75 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$, como apreciado na Figura 6.21. Atingindo uma área aproximadamente de $1,00 \text{ km}^2$, e com o centro da pluma na coordenada UTM $x= 742127,62$ $y= 7182519,50$ a uma distância de 3555 metros ao Sudeste do lugar do derrame. Observa-se a fragmentação da pluma.

FIGURA 6.21 - 50 HORAS APÓS O DERRAMAMENTO



7.4 CONCLUSÕES

Sobre o volume de óleo remanescente após 5 dias temos que nos dois primeiros cenários existe uma redução de 25% do volume inicial. Já no terceiro cenário existe uma redução de 29%, isto devido que existe adicionalmente a velocidade de 6 m/s do vento.

O deslocamento da pluma no primeiro cenário é de Leste a Oeste de forma oscilante com tendência de aproximação ao contorno aberto, isto é, saindo da área modelada. A pluma atinge sua maior distância do ponto do lançamento, entre os tempos discretizados, quarenta horas após o lançamento a uma distância de 2184 metros Leste. A maior área da pluma com espessura superior a $1,0 \cdot 10^{-6}$ mm acontece quarenta horas após o derramamento atingindo uma área de 2,9 Km². No transcurso das cinquenta horas a pluma não atinge as margens da região.

No cenário dois a pluma se desloca de Este a Oeste de forma oscilante também com tendência de aproximação ao contorno aberto, atingindo a maior distancia do ponto de lançamento após 40 horas do derramamento. A maior distância atingida é de 4986 metros E do ponto do derramamento, distância esta maior que a do cenário um. A maior área da pluma com espessura superior a $1,0 \cdot 10^{-6}$ mm acontece quarenta horas

após o derramamento atingindo uma área de 3 km². No transcurso das cinquenta horas de modelagem a mancha não atinge as margens da região.

No cenário três a pluma movimentada se para o Noroeste oscilando de Oeste a Este em direção a margem Norte da região, atingindo o maior afastamento do ponto de lançamento após cinquenta horas do derramamento sendo esta distância de 3555 metros do lugar de derramamento. A pluma atinge a maior área com espessura acima de $1,0 \cdot 10^{-6}$ mm após de 30 horas do derramamento com uma área de 2,5 km². A pluma atinge a margem Norte após trinta horas do derramamento. Neste caso a pluma atinge as margens.

Entre estes três cenários unicamente o terceiro atinge a margem da baía sendo este o de maior risco e portanto de maior significado como base de dados para treinamento de equipes de contingência. Informação importante estas como ser, o local em que atinge a margem, o tempo em que a margem chega a ser atingida o volume remanescente e a espessura da mancha.

Segundo NOERNBERG (2002) o índice de vulnerabilidade ambiental para esta margem da baía de Paranaguá é 9 que corresponde a planície de maré abrigada com bancos de areia e lodos protegidos sem presença significativa de manguezais.

8 CONCLUSÕES

A condição de contorno no limite aberto em Paranaguá, foi implementada com base em apenas um ponto de observação. O nível do mar observado neste ponto foi repetido para todos os pontos da grade pertencente ao contorno aberto. É de se esperar que um maior numero de observações de elevação de nível do mar no contorno aberto proporcionaria uma melhor especificação das condições de contorno para o modelo.

A disponibilidade de um maior numero de observações de elevação do nível do mar no interior do domínio também podem melhorar a calibração do modelo.

Ao respeito das limitações do modelo hidrodinâmico tem-se que o modelo é um modelo barotrópico, isto é, são desprezados os movimentos do fluxo devido à variação da densidade seja por causa do gradiente de salinidade ou pelo gradiente de temperatura.

A trajetória do óleo derramado é calculada com base num modelo de traçadores, assumindo que o óleo é um conjunto de partículas que se desloca por advecção e difusão. Apenas é simulada a trajetória horizontal das partículas, desprezando se o movimento vertical. Destaca-se a necessidade de obter-se estudos sobre a interação do óleo com as margens, no sentido de modelar a quantidade de óleo removido da superfície, após contato com determinados tipos de margens.

O modelo de decaimento do petróleo considera unicamente os processos que ocorrem nos cinco primeiros dias, não podendo avaliar processos como a biodegradação e foto-oxidação que ocorrem com mais tempo, aumentando desta forma as incertezas devido não serem considerados estes processos. A avaliação da evolução das propriedades e restantes processos é feita para o conjunto da massa assumindo um comportamento homogêneo e não se fazendo diferenciação da massa, ou seja não se tem subgrupo de massa. As condições do ambiente e propriedades da água são consideradas constantes em qualquer parte da massa, num determinado instante. O valor assumido para essas condições ambientais é aquele que é registrado na origem do acidente.

A consideração dos processos do petróleo vista como massa única tem inconvenientes. Por um lado dificulta a modelagem de derrames em contínuo. Por

exemplo no caso de um derrame de 5 dias, a propriedade do óleo a ser derramado após esse período de tempo não tem relação com o comportamento do óleo já envelhecido, que permanece na superfície. Por outro lado o modelo deixa de ser sensível a condições ambientais variáveis em diferentes localizações do óleo. Por exemplo, pode acontecer que parte do óleo fique num local do acidente, e que o restante sofra um forte deslocamento em que determinadas condições ambientais sejam diferentes daquelas condições registradas na origem.

Através dos 3 cenários estudados é possível quantificar a utilidade do modelo como sistema de apoio pois fornece dados objetivos de dimensão, espessura, tempo e sentido de deslocamento da pluma as quais são de extrema importância para trabalhos de caráter preventivo ou de caráter operacional.

Os dados fornecidos pelo sistema de modelagem no âmbito preventivo podem ser utilizados como dados para treinamento de equipes de contingência quando estes dados forem resultados de casos hipotéticos de derrame, através dos quais pode se avaliar o nível de risco dos casos, para isto é necessário dispor de cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo SAO da região. Devido a que os resultados apresentam casos prováveis de dinâmica da pluma é possível ser usados para definir requerimentos mínimos de contingência e dar suporte as políticas de proteção.

É possível o uso da modelagem em caráter operacional através da modelagem em tempo real para planejamento de ações emergenciais nas disposições de equipes e equipamentos de contingência visando um melhor desempenho destes devido ao conhecimento antecipado do comportamento da pluma. Para este propósito é necessário dispor dados primários reais da ocorrência o que implica num desenho amostral completo e correto.

No caso do uso do modelo como ferramenta para treinamento de equipes e estabelecer requerimento mínimo de contingência ou de suporte de políticas de proteção é necessário a disponibilidade de dados primários. No caso da baía Antonina-Paranaguá unicamente a administração dos portos de Paranaguá e Antonina (APPA) vem tomando medidas nesse sentido, mas é improvável, além de injusto, que somente um dos modificadores ambientais se responsabilize por estes trabalhos. Os problemas de derramamento de óleo podem ser estudados pelo uso de sistemas de modelagem

hidrodinâmica mas um dos problemas a ser resolvidos é a coleta de dados primários suficientes e de qualidade a serem utilizados.

Se por um lado tem-se a resolução 293 do CONAMA que dá as diretrizes sobre o uso de modelagem para Planos de Emergência Individual que cada empreendedor na área do óleo deve implementar, fica pendente quem deverá coletar os dados necessários para implementar os mesmos. Assim, da falta de diretrizes específicas para apresentação de características da pluma a ser modelada como sua espessura mínima ou concentração de óleo a ser considerado, sobre isto ROSMAN (2000) propõe um critério para uniformizar os limites de Apresentação de resultados de modelos de derrame de óleo, assim como também ressalta a necessidade da modelagem minuciosa até uma espessura de 0,1 mm devido às possibilidades eficientes de remoção do óleo.

O decreto federal 4.871 de 06/11/2003 dispõe sobre a instituição dos Planos de Áreas (PA) para o combate à poluição por óleo em áreas de jurisdição nacional, o propósito destes Planos é integrar e consolidar os Planos de Emergência Individual, para contemplar a Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em Casos de Poluição por óleo (OPRC) estabelecida pela Organização Marítima Internacional ou International maritime Organization (IMO) em 30/11/1990.

Para o estudo de cenários hipotéticos existe a necessidade de realizar estudo específico sobre as possíveis fontes poluidoras para definir volumes prováveis de emissão, características do óleo e regime em que o derrame pode ocorrer. É necessário uma melhor calibração mediante batimetria recentes, maior quantidade de pontos de coletas de níveis na região tanto para estabelecer o contorno aberto como para dados de calibração de maior precisão.

REFERÊNCIAS

ASCE. Task Committee on Modeling Oil Spills of the Water Resources Engineering Division, State-of-the-art Review of modeling transport and fate of oil spills, **Journal of Hydraulic Engineering**, v.122, n. 11, 1996, p. 549-609.

ANGULO, R. J. **Geologia da planície costeira do estado do Paraná**. São Paulo, 1992. 334 f. Tese (Doutorado em Geologia sedimentar) – setor de Geociências, Universidade de São Paulo.

ABBOT; BASCO. **Computational fluid mechanics, an introduction for engineering**, United Kingdom: Longman Group, 1989.

ABBOT; LARSEN. Modelling circulation in depth-integrated flow. **Journal of Hydraulic Research**, v. 23., n. 5. 1985.

ALDAMA, A. **Theory and application of two and three scale filtering approaches for turbulent flow simulation**. Phd. Thesis, Dept. Civil Engineerin, Massachusetts Institute of Technology, 1985.

ALDAMA, A. **Filtering Techniques for turbulent flow simulation**. Berlin: Springer Verlag, 1990.

BAKER, A. J. **Finite element computational fluid mechanics**, New York: McGraw-Hill, 1983.

BUCHANAN, I.; HURFORD, N. Method for predicting the physical changes in oil spilt at sea. **Oil & Chemical Pollution**, v.4 , n.4 1988, p. 311-328.

BORTHWICK ; JOYNES. Laboratory study of oil slick subjected to nearshore circulation, **Journal of Environmental Engineering**, , v. 118, n. 6, 1992, p. 905-922.

BIGARELLA, J. J. et al. Natureza dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina, **Rev. Instituto de Biologia e pesquisas Tecnológicas**, 1970, v. 15, p.30-33.

BIGARELLA, J. J. ; KLEIN, R. M. ; LANGE, R. B.; LOYOLA E SILVA, J. ; LARACH, J. O. L. & RAUEN, M. J. **A serra do mar e a porção oriental do estado do Paraná. Um problema de segurança ambiental e nacional**. Secretaria de Estado do Planejamento-ADEA (Associação de Defesa e Educação Ambiental), J.J. Bigarella; R. D. Becker; D. J. Matos & A. Werner (Eds.), 1978, Curitiba, PR, p. 248

CALLIARI; KLEIN. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí,. **Pesquisas RS**, 1993, v. 20, n.1, p.48-56.

CAMARGO, R. C. **Estudo numerico das circulações admosférica e Oceanica na Região da Baía de Paranaguá**. São Paulo, 1998. 180 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – setor Geofísica, Universidade de São Paulo.

CEM, **Centro de Estudos do Mar – Porto de Paranagua e Antonina, 2003, Relatório de Medições de Maré - Paranaguá - PR, janeiro/1995 a setembro/2000**.

CONAMA. Resolução n. 293 de 12 de dezembro de 2001. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do plano de emergência individual para incidentes de poluição por oleos originados em portos organizados, instalações portuárias ou terminais, dutos, plataformas, bem como suas

respectivas instalações de apoio, e orienta a sua elaboração. Relator: José Sarney Filho. **Diário oficial da Republica Federativa do Brasil.**

CHUNG, T. J. **Finite element computational fluid mechanics.** New York: McGraw-Hill, 1967.

COSTA, M. **Evolução de hidrocarbonetos derramados nas zonas costeiras e estuarinas.** Coimbra, 1999. 300f. Dissertação (mestrado em Geofísica) – setor de Tecnologia , Faculdade de ciencias e tecnologia , Universidade de Coimbra.

COSTA , et al. Quantificação espacial de clorofila na água do mar utilizando dados do sensor TM/LANDSAT-5: Região costeira de Ubatuba, SP. In: **Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto**, 9. 1999, Santos. 12 p.

CURCIO ET AL Desmatamentos de margens de rios: a situação do rio Cachoeira. In: **Caracterização do Nimad do Litoral paranaense. Meio ambiente e desenvolvimento no litoral do Paraná. Diagnostico.** R. E. de Lima & R. R. B. Negrelhe, Editora da UFPR, Curitiba, 1998, p.77-81.

DAUBERT; GRAFFE. Quelques aspects de écoulements presque horizontaux a deux dimension en plan et non-permanents application aus estuaries. **La Houille Blanche** v. 8. 1967, p.847-860.

DAKHOUL; BEDFORD. Improved averaging method for turbulent flow simulation. v. a., v. b. Int. **J. Num. Methods in Journal of methods in Fluids**, 1986 a,b.

DELVIGNE, G. A. L. ; SWEENEY, C. E. Natural dispersion of oil, **Oil & Chemical Polution**, 1998, v.4: p. 281-310.

DICKS. B. The environmental impact of marine oil spills. In: **INTERNATIONAL SEMINAR ON TANKER SAFETY, POLLUTION PREVENTION, SPILL RESPONSE AND COMPENSATION**, Rio de Janeiro: ITOPF, 1998, 8 p.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. Rio de Janeiro: 1995. **Carta náutica 1824.** Da barra de Paranaguá a Antonina. 1 mapa; color.; 1108,7x757mm. Escala 1:50000.

DIPIETRO, N. D. ; HUH, C. ; COX, R. G. The hidrodynamics of the spreading of one liquid in the surface of another, **Journal of Fluid Mechanics**, 1978, v. 81, n. 3, p. 529-549.

DOULIGERIS, C. Et al. Development of a national marine oil transportation system model, **Spill Science & Tecnology Bulletin**, 1997, v.4(2): p. 113-121.

DOERFFER, J. W. **Oil spill response in the marine environment**, Pergamon Press.

FAY, J. A. The Spread of oil slicks on a calm sea. **Oil on the Sea**, Plenum Press, New York, 1969, p. 53-63.

FAY, J. A. **Physical processes in the spread of oil on a water surface**, proceedings of the joint conference on prevention and control of oil spills, American Petroleum Institute, Washington D.C., 1971, p. 463-467.

FERZINGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dinamics.** New York: 3. ed., Springer, 2002.

FORTUNA, A. O. **Tecnicas computacionais para dinâmica dos fluidos.** São Paulo: Editora da universidade de São Paulo, 2000.

FLETCHER, C. A. J. **Computational techniques for fluid dynamics**. Berlin, Springer, v. 1. 1991.

FLORES, et al. Computer Modeling of Oil Spill Trajectories with a High Accuracy Method. **Spill Science & Technology Bulletin**. v. 5, n.5-6, 1999, p. 323-330.

FINGAS, et al. Physical and Chemical Studies on Dispersants: The effect of Dispersant Amount and Energy. Proceedings of the Sixteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, **EnvironmentCanada**, Ottawa, 1993. p. 861-876.

FINGAS, et al., Oil Spill Behaviour and Modeling. **Environmental Technology Center**, Environment Canada, Ottawa, Canada 1996.

GIRAULT, V.; RAVIART, P. A. **Finite element method for Navier-Stokes equations**. Berlin: Springer, 1986.

HIRSCH, C. **Numerical computation of internal and external flows**. v. 1. John Wiley & Sons, 1988.

HANSEN, D. V. & RATTAY, M. Jr. Gravitational circulation in straits and estuaries, **Journal of Marine Research**, 1965, v. 23, p.104-122.

HERRLING. **Development of a numerical model for the Paranaguá Bay in Brazil**. Kiel, 2003 106 f. Dissertação (Mestrado em Geociências costeira) - setor de Geociências, Instituto de Geociências.

HUANG; MONASTERO. Review of the state-of-the-art of oil spill simulation models. Final Report submitted to the **American Petroleum Institute**, 1982.

IPARDES, **Zoneamento do litoral paranaense** (Convênio SEPL/IPARDES). Curitiba, 1989, p.175

IAPAR. (1978). **Manual agropecuario para o Paraná**. IAPAR-Fundação Instituto Agrônômico do Paraná.

INPH. (1988). **Medições de vento para a localidade de Pontal do Sul/Pr-Agosto/1982 a Dezembro/1986**

ITOPF. Aerial observation of oil. **technical information paper N 1**, 2002. Disponível em: Acesso em: <http://www.itopf.com/tip2.html> 25 Jan. 2004.

ITOPF. fate of marine oil spills. **technical information paper N 2**, 2002. Disponível em: <http://www.itopf.com/tip2.html> Acesso em: 25 Jan. 2004.

JOKUTY et al., **Property of crude oils and oil products**. Manuscript Report EE-165, Environmental Protection Service, Environmental Canada, Ottawa, Ontario, 1999.

KJERFVE, Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystem. **UNESCO/UNDF Regional Project "Mangrove Ecosystem in Asia and the Pacific"**(RAS/79/002 e RAS/86/120), 1990. p.79.

KNOPPERS, B. A.; BRANDINI, F. P. Ecological studies in the bay of Paranaguá II. Some physical and chemical characteristics. **Neritica**, 1987, v.2, p. 79-93.

KUNDU, P. K. **Fluid Mechanics**. Londres: Academic Press, 1990, 638 p.

LANNA. Regularização de vazões em reservatórios. In: **Hidrologia (ciência e aplicação)**, CEM Tucci (Org.), editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993, p. 703-726.

LEITÃO, P. M. C. F. L., **Modelo de Dispersão Lagrangeano Tridimensional**. Lisboa, 1996. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – setor Oceanografia, Universidade Técnica de Lisboa.

LEHR, W.; JONES, R.; EVANS, M. ; SIMECEKBEATTY, D. ; OVERSTREET R. **Revisions of the ADIOS oil spill model**, Environmental Modelling & Software, 2002, v.17, p. 191-199.

MARTINS, F. A. B. C. M. **Modelação matemática tridimensional de escoamento costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica**. Lisboa, Portugal, 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – setor de Recursos Hídricos, Universidade Tecnica de Lisboa.

MARTIN, F. **Etude de l'ecosysteme mangrove de la Baie de Paranaguá (Paraná, Bresil): analyse des impacts et propositions de gestion rationnelle**. Tese de Doutorado. Universite Paris VII. . 1992, p.280.

MARONE; CAMARGO. Marés meteorológicas no litoral do Paraná:O evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**, Curitiba, v. 8., n. 1-2, editorada da UFPR, 1994, p. 73-85.

MARONE; JAMIYANAA. Tides and Tidal Modelling in the Paranaguá Bay, PR. **Neritica** , Curitiba, 1997.

MARONE et al. **Modelagem numérica costeira no Estado do Paraná: do usuário ao Desenvolvedor dos dados ao produto**.Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná.2003, 28p. Relatorio Técnico.

MACKAY, D. ; MATSUGU, R. S. Evaporation rate of liquid hydrocarbon spills on land and water, **Canadian Journal Chemical Engineering**, 1973, p. 434-439.

MACKAY et al. Oil spill processes and models., Manuscript Report No. EE-8, **Environment Canada**, Ottawa, Ontario 1980.

MALISKA, C. R. ,**Transferencia de calor e mecanica dos fluidos computacional**, Rio de Janeiro: livros tecnicos e cientificos, 1 ed., 1995.

MANTOVANELLI, A. M. **Caracterização da dinâmica hidrica e do material Particulado em suspensão ba baia de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. Curitiba, 1999. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geologia ambiental) – setor de ciências da terra, Universidade Federal do Paraná.

MIRANDA, L. B. Cinemática e dinâmica de estuários. São Paulo : **Instituto Oceanografico da USP (IOF827)**, v. 1. 1996, p.360.

MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles, **Journal Colloidal Science**, 1951, v.10, p. 162-170.

MOHAMMADI; PIRONNEAU. **Analysis of the k-Epsilon turbulence model**. Paris: John Wiley & Sons, 1994.

NIMMER, E. Geografia do Brasil: Região Sul. In: **Clima**. Rio de Janeiro: Sergraf-IBGE, 1992. p. 151-187.

NOAA. **ADIOS™(Automated Data Inquiry for Oil Spill) user's manual**. Seattle: Hazardous Materials Response and Assessment Division, NOAA. Prepared for the U. S. Coast Guard Research and Development Center, 1994. p. 50

NOAA. **ADIOS™(Automated Data Inquiry for Oil Spill) version 2.0** Seattle: Hazardous materials Response and Assessment Division, NOAA. Prepared for the U. S. Coast Guard Research and Development Center, Groton Connecticut, 2000.

NOERNBERG. **Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá-Paraná-Brasil: um estudo a partir de dados in situs e landsat**. Curitiba, 2001. 180 f. Dissertação (Doutor em Geologia Ambiental) – setor de Ciências da terra, Universidade Federal do Paraná

NOERNBERG; LANA. A sensibilidade de manguezais e marismas a impactos por óleo: fato ou mito?. **Geografares**, Vitória, no 3, jun. 2002 p.109-121.

ODEN, J. T. **Finite elements of non-linear continua**. McGraw-Hill, New York, 1972.

ODRESKI, L. L. R. O. **Evolução sedimentar e batimétrica da baía de Antonina-PR**. Curitiba, 2002. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – setor ciência da terra, Universidade Federal do Paraná.

OKA-FIORI; CANALI, N. E. **Mapeamento geomorfológico**. In: Lima, et al. Caracterização do Nimad do litoral paranaense. Meio ambiente e desenvolvimento do litoral do Paraná. Diagnóstico. Curitiba. UFPR, 1998. p. 41-48.

OLEA, R. **Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary**. Oxford University Press, 1991, p.177.

OZMIDOV, R. V. **Diffusion of contaminants in the ocean. Oceanographic Sciences Library**, Kluwer Academic Publishers, 1990, 283 p.

PAYNE et al. **Integration of suspended particulate matter and oil transportation study**. Final report, Report to Minerals Management Service, MMS 87-0083, 1987.

PALACIO, C. A. P. T. **Metodologia para la validacion de modelos Hidrodinamicos utilizando amplia información de campo: Aplicación a la bahia Melford en la costa del mar del Norte alemán**. Medellin, Colombia, 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado em Aproveitamento de recursos hídricos) – setor Tecnologia, Universidad Nacional de Colombia.

PALADINO, E. E. P. **Modelagem matematica e simulação numérica de trajetórias de derrames de petróleo no mar**. Florianópolis, 2000. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – setor da Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

PEDLOSKY, J. **Geophysical fluid dynamics**, New York: 2 ed., Sringer Verlag, , 1987.

PETROBRAS 1997. **Estudos ambientais em áreas oceânicas e costeiras no sul do Brasil**. 1CD-ROM. Relatório Final.

RASMUSSEN, D. Oil spill modelling. **Oil Spill conference**, American Petroleum Institute, 1985.

ROSMAN, P. C. C. Et al. **Metodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: v. 1.. ABRH, 1989.

ROSMAN, P. C. C. Et al. **Metodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: v. 3. ABRH, , 1997.

ROSMAN, P. C. C. Et al. **Metodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: v. 5, 19 ed. ABRH. 2001.

ROSMAN, P. C. C. **Documento de referência técnica do SisBAHIA**, Rio de Janeiro: COPPE Fundação, 2000.

ROSMAN, P. C. C. **Modelagem em tempo real para planejamento de ações emergenciais**, Rio de Janeiro: COPPE Fundação, 2003, 26 p. Relatório técnico.

REED M. ; JOHANSEN O. ; BRANDVIK, P. J. ; DALING, P. ; LEWIS, A. ; FIOCCO, R. ; MACKAY, D. & PRENTKI R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art, **Spill Science & Tecnology Bulletin**, 1999, v.5(1): p. 3-16.

REED , M. The physical fates component of the natural resource damage assessment model system. **Oil & Chemical Pollution**, v.5. 1989, p. 99-123

SOARES, C. R. S. **Natureza dos sedimentos da superfície de fundo das baías das Laranjeiras e de Guaraqueçaba –complexo estuarino da baía de Paranaguá** (estado do Paraná, Brasil). Rio Claro, 1990. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geociencias) – Instituto de Geociencias e Ciencias Exatas, Universidade Estadual Paulista.

SOARES, et al. Considerações sobre os sedimentos de fundo das baías de Laranjeiras e de guaraqueçaba, Complexo estuarino da baía de Paranaguá (paraná, Brasil). **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 43, Curitiba, 1996, p. 41-60.

SÁ, F. S. **Distribuição e fracionamento de contaminantes nos sedimentos superficiais e atividades de drenagem no complexo estuarino da baía de Paranaguá (PR)**. Curitiba, 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – setor de ciências da terra, Universidade Federal do Paraná.

SPEZIALE, C. On nonlinear k-l an k-ε models of turbulence. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 178, 1987, p. 459-475.

SPEIGHT, J. G. The chemical and physical structure of petroleum: effects on recovery operations, **Petroleum Science & Enguneering**, Laramie, v. 22, n. 1, p. 3-15, 1999.

STIVER, W.; MACKAY, D. **Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures**, Environmental Science and Technology, 1984, p. 834-840.

STOLZENBACH, et al. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slick. **MIT Sea Grant Program**, Report N. 222, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1977.

TENNEKES, H. ; LUMLEY, J. ; **A first course in turbulence**, Cambridge, MIT press, 1972.

TANNEHILL, et al. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, Bristol: 2 ed., Taylor and francis, 1984.

YANG, W. C. ; WANG, H. **Modelling of oil evaporation in aqueous environment**, Water Reserch, 1977, p. 89-101.

VERBOOM ET AL. Boundary conditions for the shallow water equations. In : **Engineering applications of computational hydraulics**, Ed. M. B. Abbot and J. A. Cunge, London, 1982.

VINOKUR, M. An analysis of finite-difference and finite-volume formulations of conservation laws. **Computational Physic**, v.81, 1989, p. 1-52.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The finite element method**. New York: McGraw-Hill, 1977.

APÊNDICE I

Dados de vento para a região e velocidades na seção de Teixeira

FIGURA A1 - VENTO NA ESTAÇÃO DE PONTAL DO SUL, PARA O PERÍODO DE AGOSTO/1982 A DEZEMBRO/1986 INPH (1988)

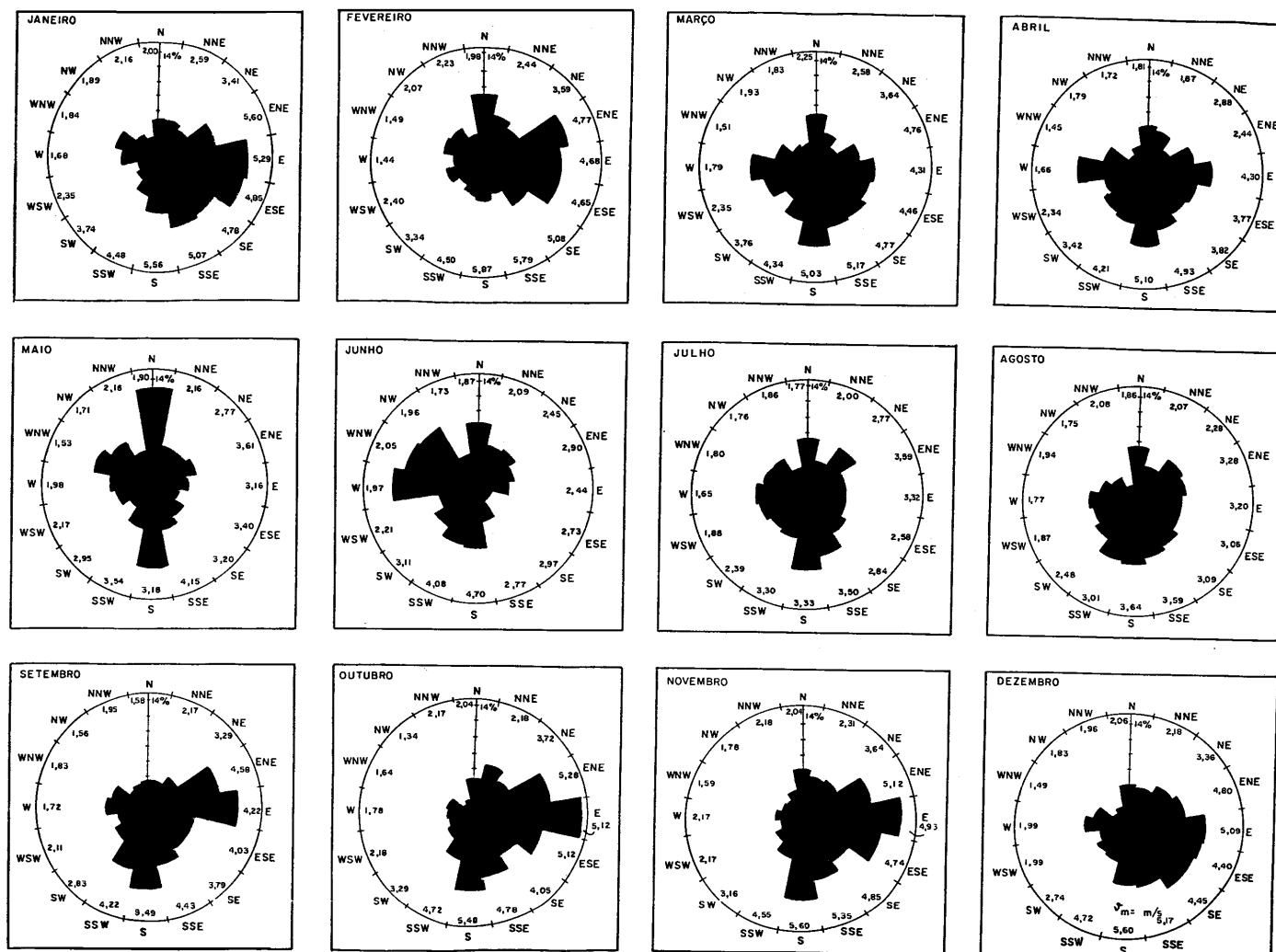


FIGURA A2 - VELOCIDADES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EM MARÉ ENCHENTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM

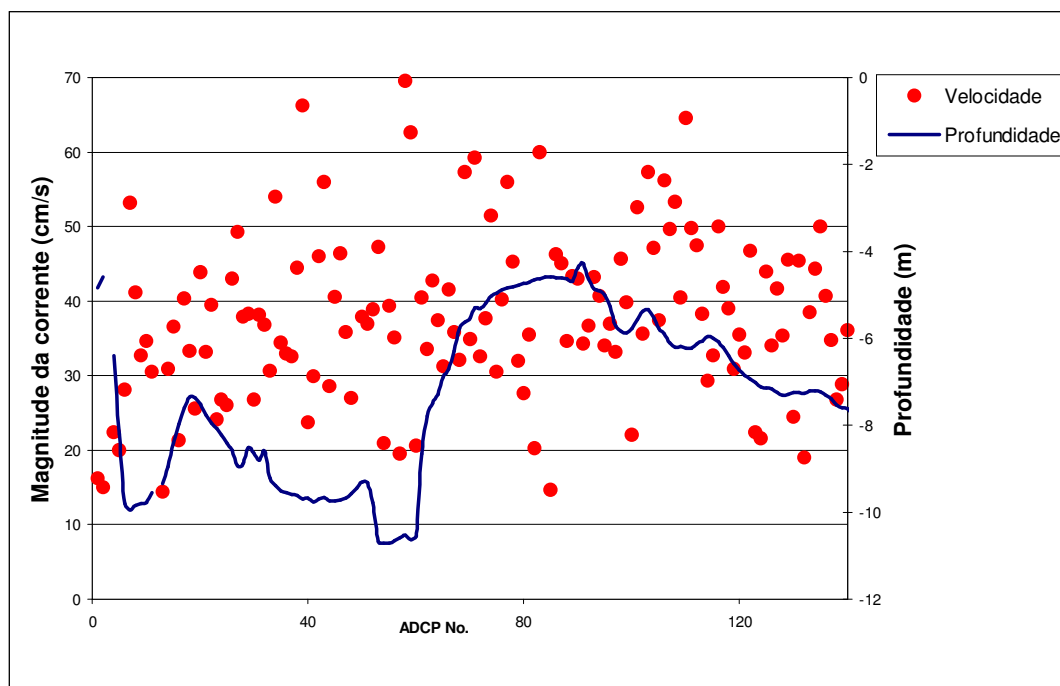


FIGURA A3 - DIREÇÕES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EM MARÉ ENCHENTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM

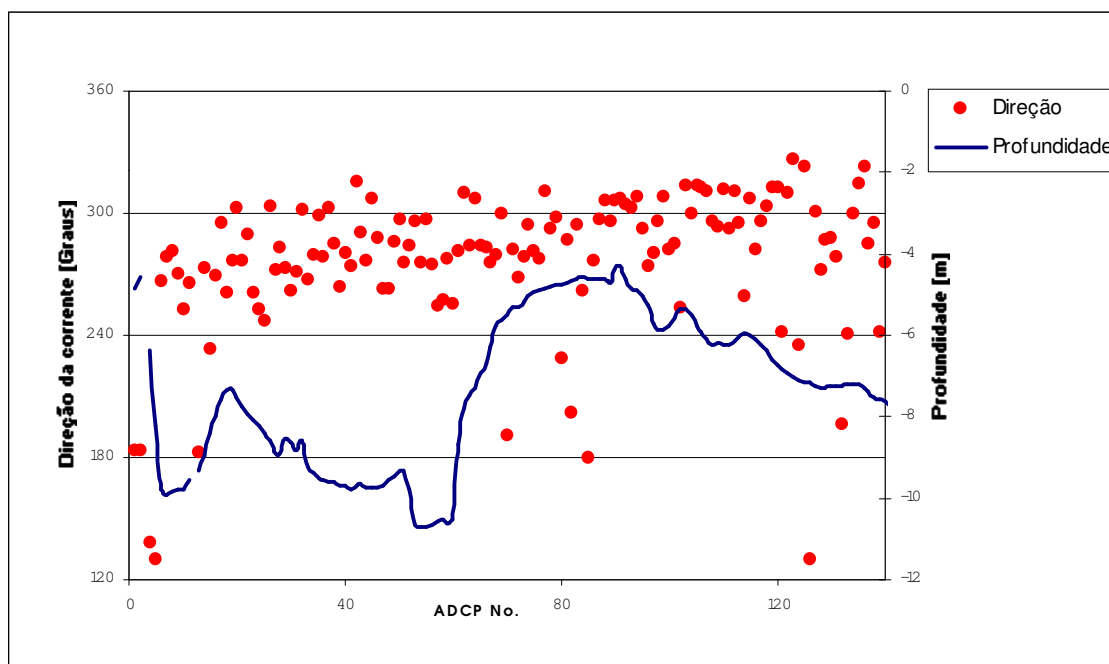


FIGURA A4 - VELOCIDADES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EM MARÉ VAZANTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM

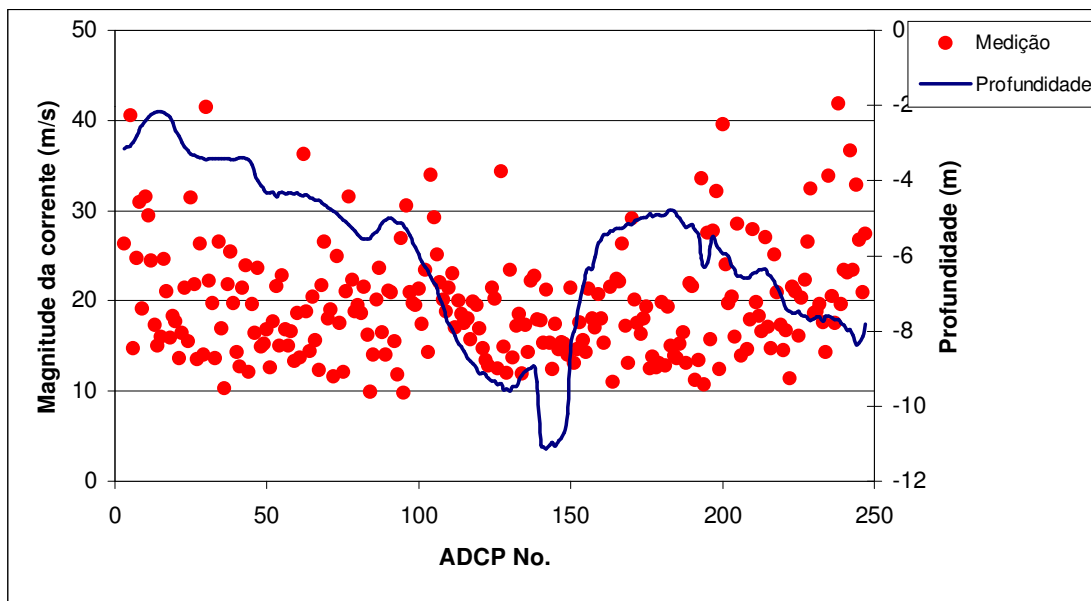
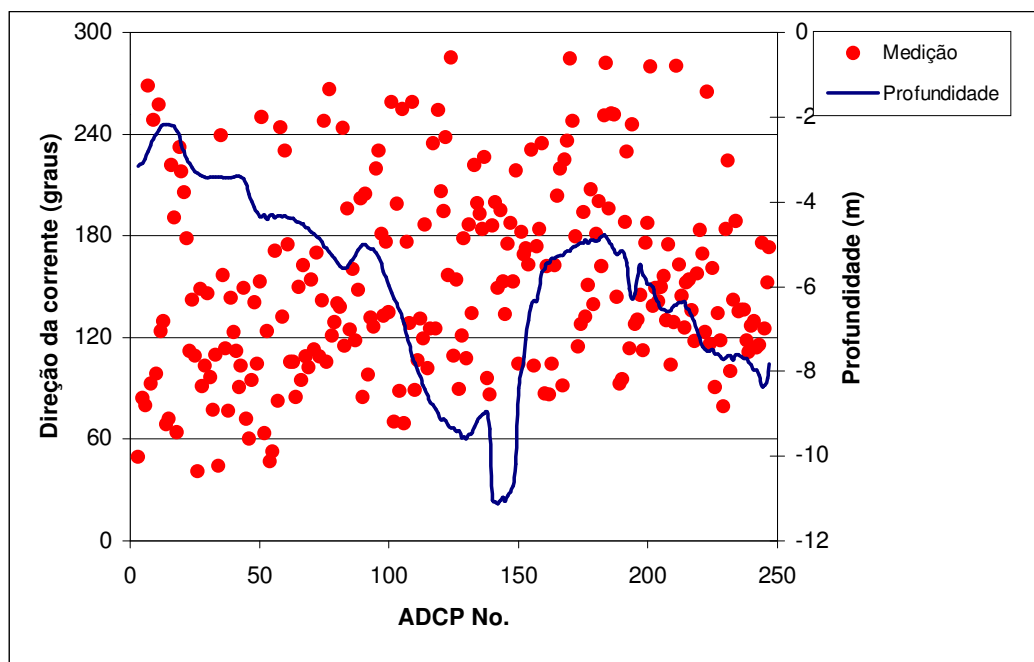


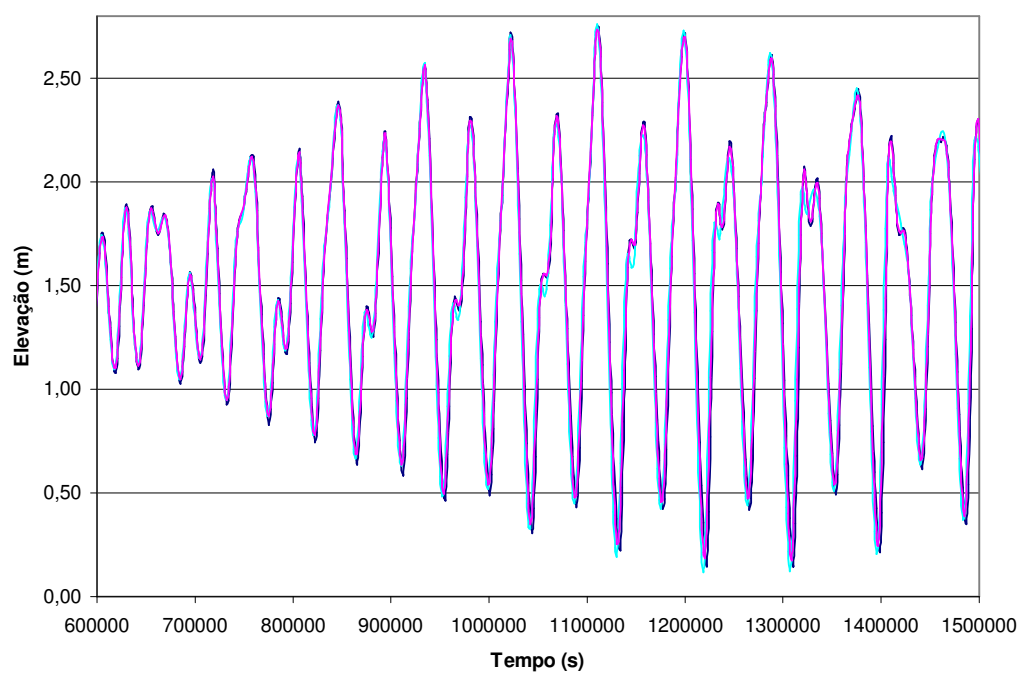
FIGURA A5 - DIREÇÕES E PROFUNDIDADES PARA A SEÇÃO DE TEIXEIRA EM MARÉ ENCHENTE MEDIDOS EM 2002 PELO CEM



APÊNDICE II

Elevação das malhas de 366, 531 e 783 elementos

FIGURA A6 – COMPARAÇÃO DE ELEVAÇÃO DAS MALHAS DE RESOLUÇÃO DE 366, 531 E 783 ELEMENTOS



APÊNDICE III

CARACTERÍSTICAS DO DECAIMENTO DO ÓLEO SEGUNDO ADIOS²

Características do decaimento para 5 dias sem considerar ação do vento. Óleo remanescente, densidade, viscosidade, conteúdo de água devido à emulsificação, óleo evaporado e benzenos.

FIGURA A7 – ÓLEO REMANESCENTE

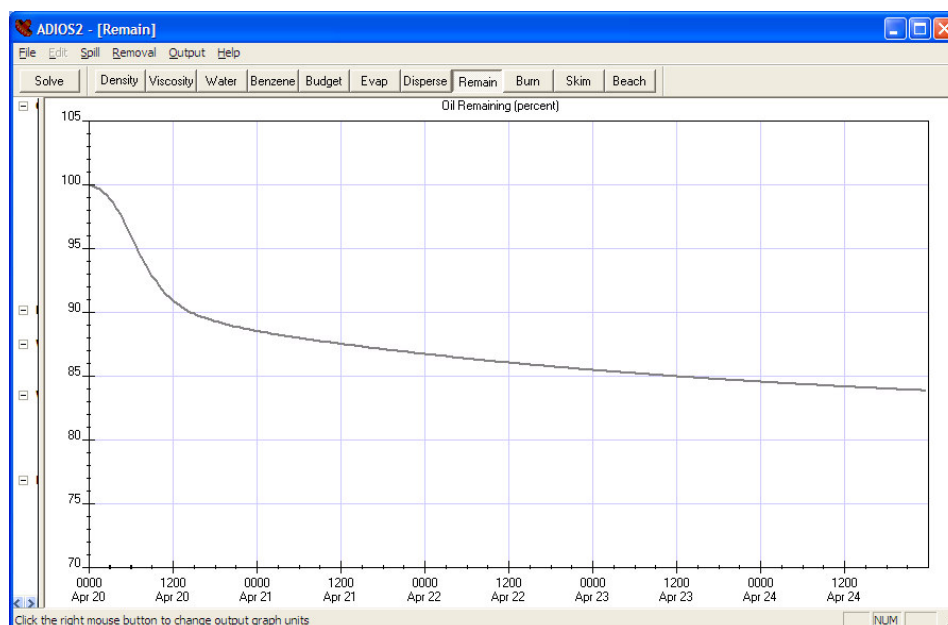


FIGURA A8 – DENSIDADE DO ÓLEO

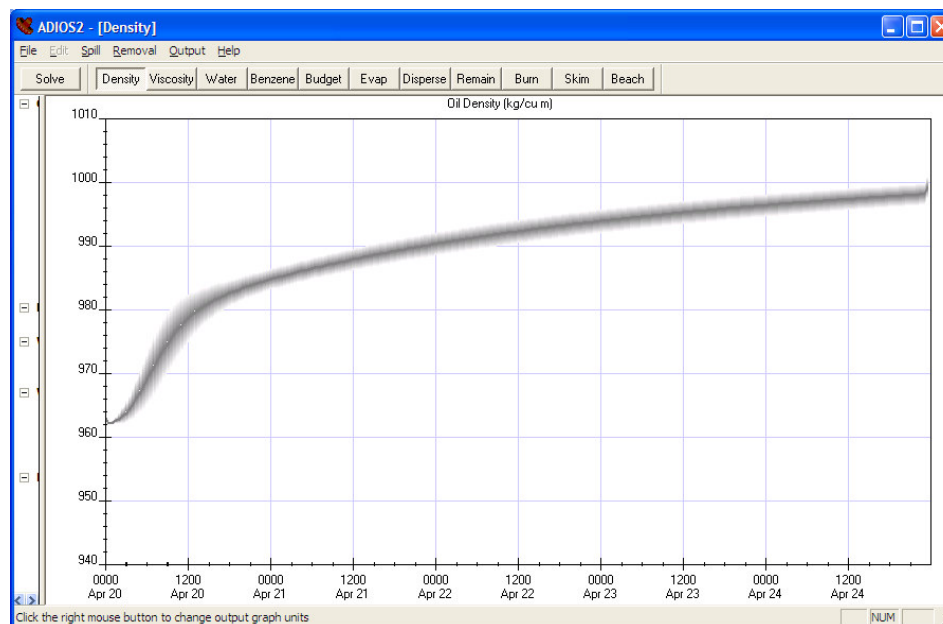


FIGURA A9 – VISCOSIDADE DO ÓLEO

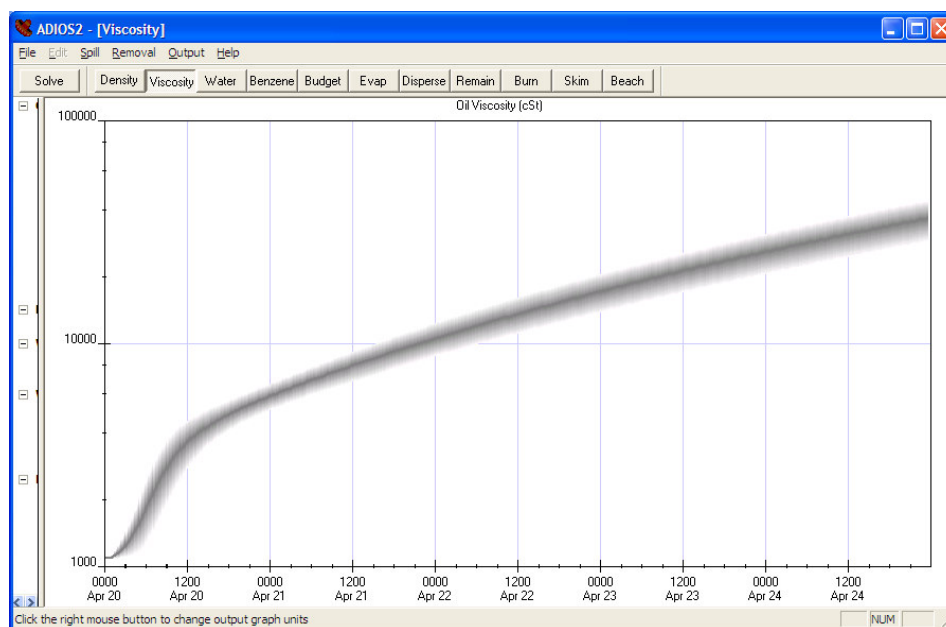


FIGURA A10 – PERCENTAGEM DE AGUA CONTIDO NO ÓLEO

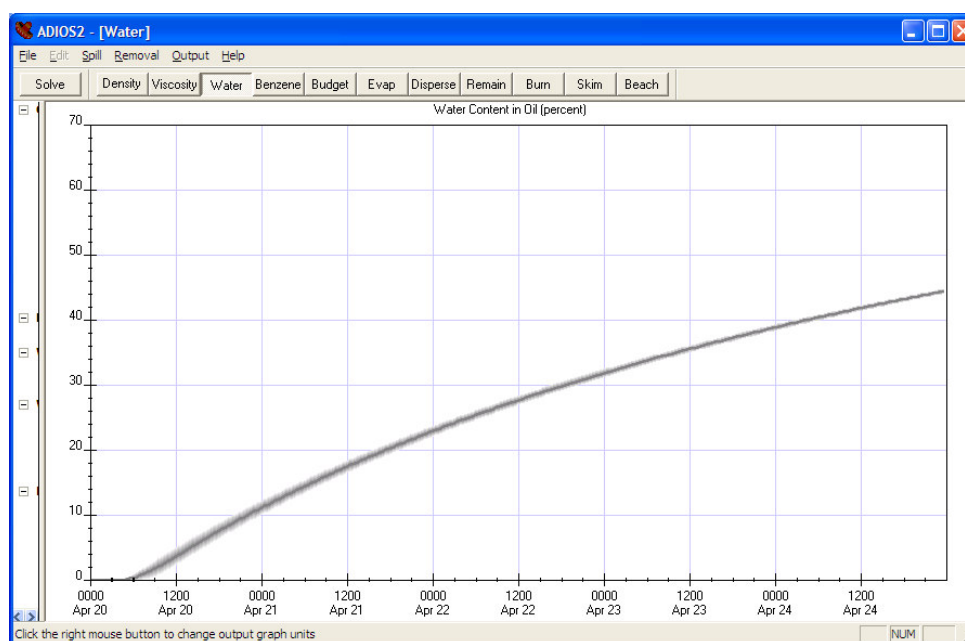


FIGURA A11 – PERCENTAGEM DE ÓLEO EVAPORADO

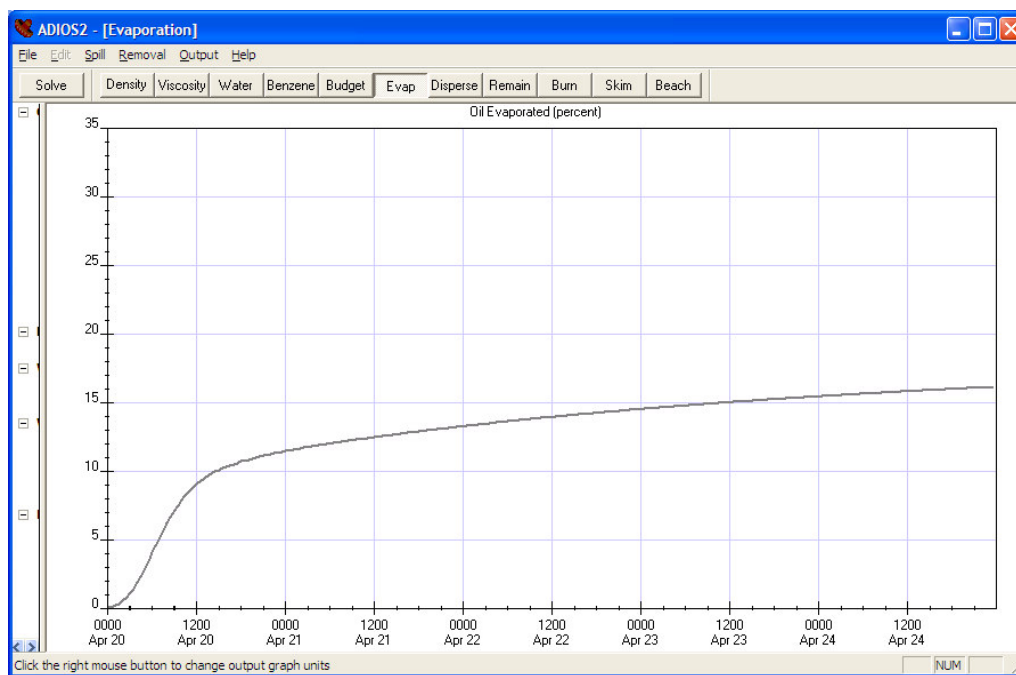
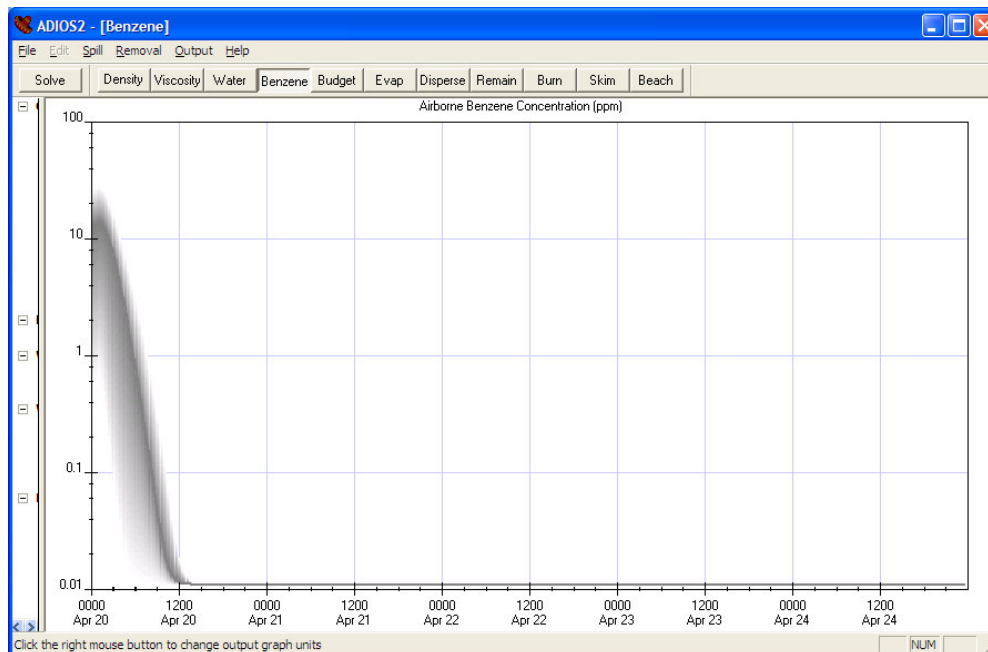


FIGURA A12 – CONCENTRAÇÃO DE BENZENO NO AR



Características do decaimento para 5 dias considerando velocidade de vento de 6 m/s. Óleo remanescente, densidade, viscosidade, conteúdo de água devido à emulsificação, óleo evaporado e benzenos.

FIGURA A13 – ÓLEO REMANESCENTE

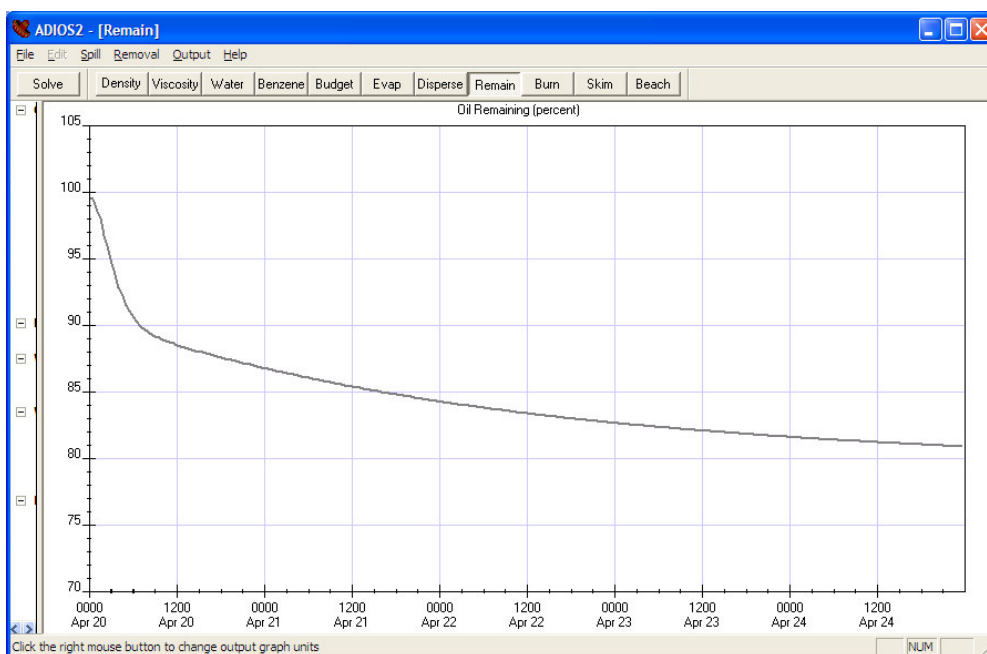


FIGURA A14 – DENSIDADE DO ÓLEO

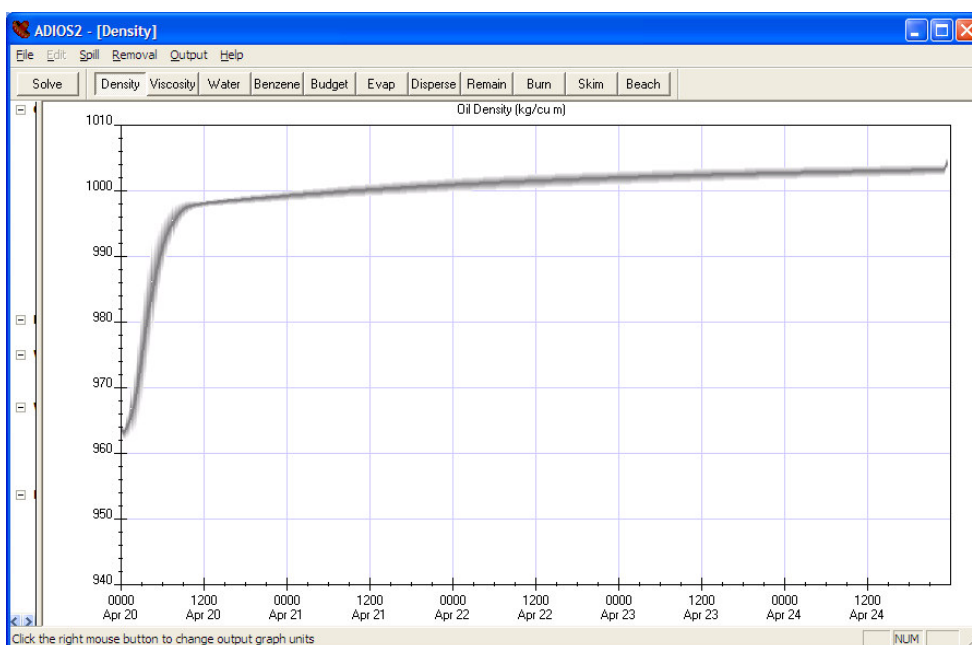


FIGURA A15 – VISCOSIDADE DO ÓLEO

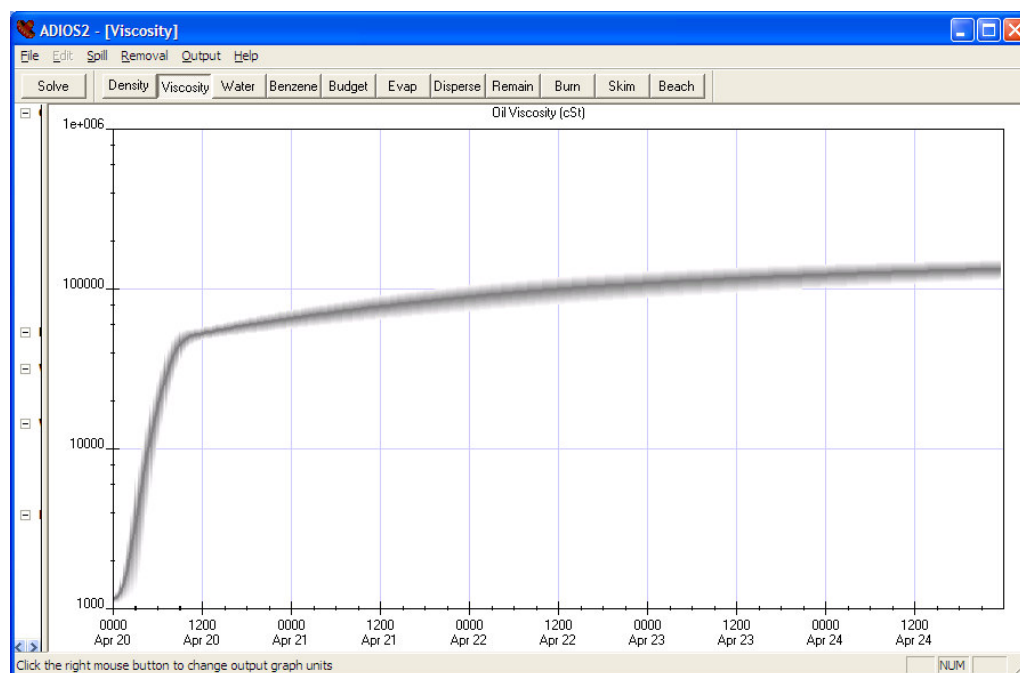


FIGURA A16 – PERCENTAGEM DE AGUA CONTIDO NO ÓLEO

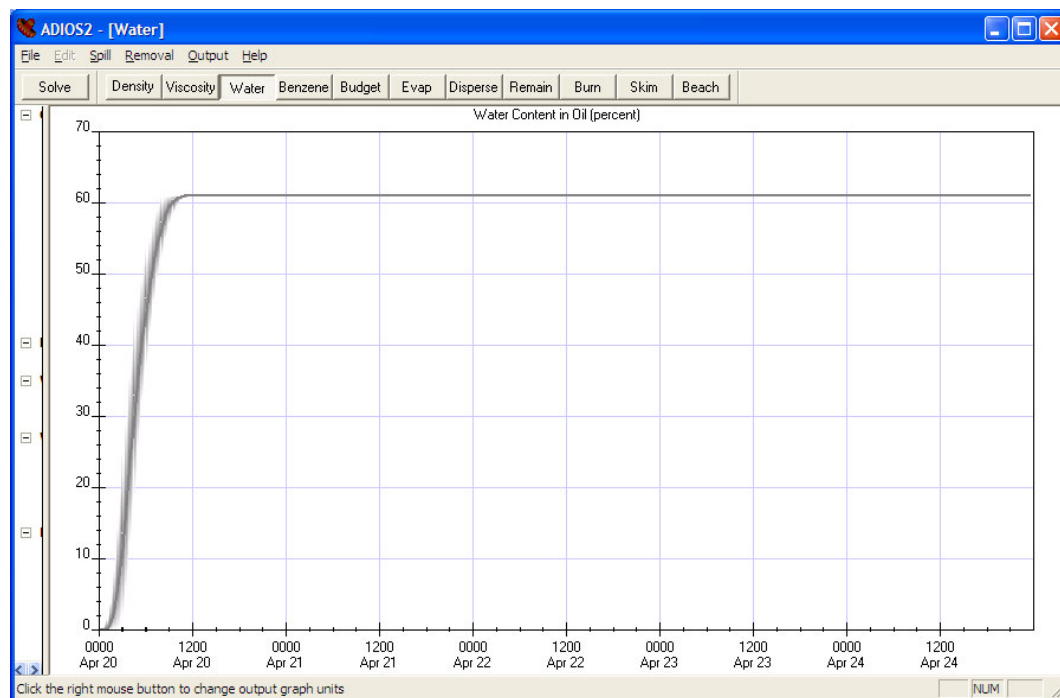


FIGURA A17 – PERCENTAGEM DE ÓLEO EVAPORADO

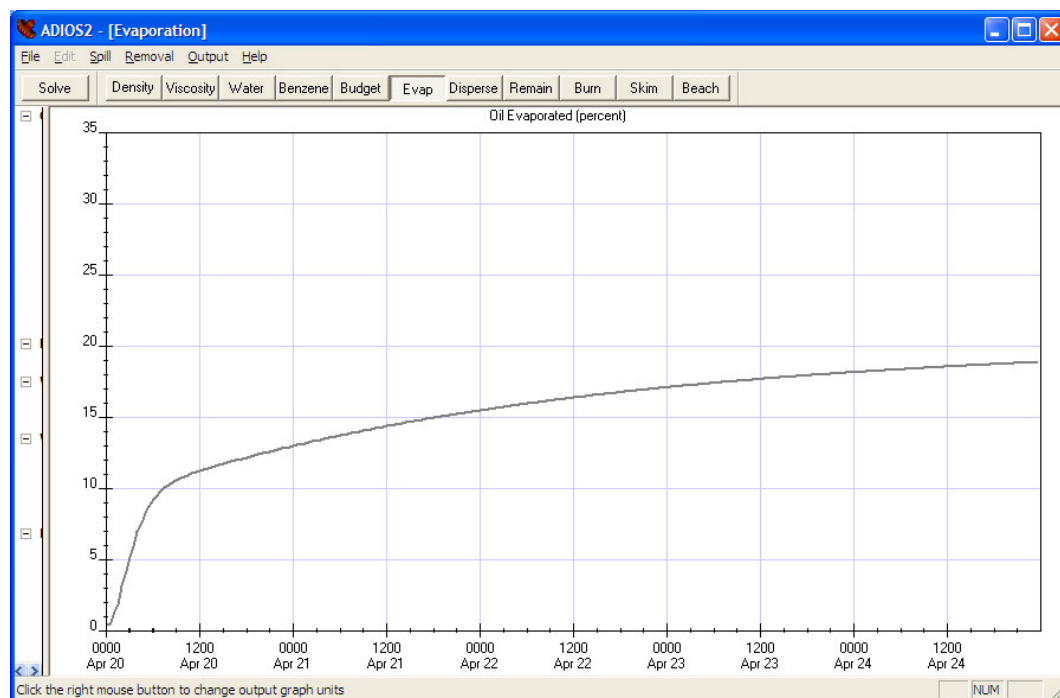


FIGURA A18 – CONCENTRAÇÃO DE BENZENO NO AR

